



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

**Facultad de Ciencias Físicas**

**Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos**

**Simulación numérica de la dinámica del flujo  
secundario helicoidal y del transporte de sedimentos en  
el modelo hidráulico del río Madre de Dios – tramo La  
Pastora**

**TESIS**

**Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos**

**AUTOR**

**Magaly CUSIPUMA AYUQUE**

**ASESOR**

**Dr. Ing. Carlos Augusto Antonio CARBONEL HUAMAN**

**Lima, Perú**

**2020**



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Cusipuma, M. (2020). *Simulación numérica de la dinámica del flujo secundario helicoidal y del transporte de sedimentos en el modelo hidráulico del río Madre de Dios – tramo La Pastora*. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico de Fluidos. Escuela Profesional de de Ingeniería Mecánica de Fluidos, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

---

## Hoja de metadatos complementarios

Código ORCID del autor	0000-0002-9855-1016
DNI o pasaporte del autor	70312459
Código ORCID del asesor	0000-0001-9465-8118
DNI o pasaporte del asesor	08772534
Grupo de investigación	“—”
Agencia financiadora	Financiamiento propio.
Ubicación geográfica donde se desarrolló la investigación	Lima, Escuela de Ingeniería Mecánica de Fluidos. 12°03'24.4"S 77°05'13.7"W
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2017 - 2019
Disciplinas OCDE	<p>Ingeniería civil  <a href="http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01">http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01</a></p> <p>Ingeniería estructural y municipal  <a href="http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.04">http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.04</a></p> <p>Ingeniería del Petróleo, Energía, Combustibles  <a href="http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.03">http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.03</a></p>





**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
(Universidad del PERÚ, Decana de América)

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS**

*ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS EN LA MODALIDAD VIRTUAL  
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE  
FLUIDOS*

*Siendo las 11:00 a.m del viernes 4 de diciembre de 2020, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la Presidencia del Ing. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA (Presidente), MSc. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA (Miembro), Dr. Ing. JORGE LUIS GASTELO VILLANUEVA (Miembro) y el Dr. Ing. CARLOS AUGUSTO ANTONIO CARBONEL HUAMÁN (Asesor), se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación de Tesis para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, mediante la Modalidad M1 – Por Sustentación y aprobación de Tesis Profesional, de la Bachiller:*

**MAGALY CUSIPUMA AYUQUE**

*El Presidente del Jurado en primer lugar dio lectura al documento formal que designa al Jurado y aprueba el acto de sustentación de la Tesis, así como del Resumen del Expediente e invitó a la citada Bachiller a realizar la presentación y exposición de su Tesis titulada: “SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DINÁMICA DEL FLUJO SECUNDARIO HELICOIDAL Y DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTO EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL RÍO MADRE DE DIOS – TRAMO LA PASTORA”.*

*Concluida la exposición de la candidata y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente del Jurado con el apoyo de la Unidad de Informática, invitó a la Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión Virtual, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.*

*Al término de la deliberación el Presidente de Jurado invitó a la candidata y al público en general a pasar a la Sala de Sesión Virtual, para dar lectura al Acta de Calificación, en cuyo contenido se ha registrado la nota obtenida por la bachiller, la misma que ha sido de:*

**17**

.....  
(NÚMERO)

**Diecisiete**

.....  
(LETRAS)

*Habiendo concluido la Sustentación de la Tesis, el Presidente del Jurado remitirá el Acta al Vicedecano Académico de la Facultad de Ciencias Físicas, quien la suscribirá dando fe de la realización del acto virtual de manera remota.*



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**  
(Universidad del PERÚ, Decana de América)

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS**

*El Acta de Calificación será remitida al Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, quien a su vez solicitará la aprobación del Consejo de Facultad para el otorgamiento del Título Profesional y su elevación al Consejo Universitario para conferir el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos a la Bachiller MAGALY CUSIPUMA AYUQUE.*

*Siendo las 13:15 horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose tres (03) Actas originales de la Sustentación de la Tesis.*

*Ciudad Universitaria, 4 de diciembre de 2020*

ING. GUIDO AMÉRICO ROZAS OLIVERA  
PRESIDENTE DEL JURADO

MSC. ING. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA  
MIEMBRO DEL JURADO

DR. ING. JORGE LUIS GASTELO VILLANUEVA  
MIEMBRO DEL JURADO

DR. ING. CARLOS A. A. CARBONELHUAMÁN  
ASESOR DEL JURADO



Firmado digitalmente por LOZANO  
BARTRA Whualkuer Enrique FAU  
20148092282 soft  
Motivo: Soy el autor del documento  
Fecha: 09.12.2020 10:24:56 -05:00

DR. WHUALKUER ENRIQUE LOZANO BARTRA  
VICEDECANO ACADÉMICO FCF

*Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:*

<https://zoom.us/j/94419018709?pwd=b2l5U0FTWUFLVUJzaG91aHNNVTBkQT09>

ID de reunión: 944 1901 8709

Código de acceso: 866353

*Grabación archivada en el siguiente enlace:*

<https://www.facebook.com/FCFUNMSM>



# Dedicatoria

*Agradecer a mis padres por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi formación profesional,  
no me alcanzara una vida para agradecerles su dedicación y motivación de superarme.*

*Virgilio e Isabel.*

# Agradecimientos

Agradecer al "**Laboratorio Nacional de Hidráulica - Alfonso Alcedán la Cruz**" por la oportunidad brindada para concluir con mi formación profesional mediante el desarrollo del trabajo de la presente tesis. Además, agradecer al Ing. Luis Fernando Castro Inga, actual Investigador del Laboratorio Nacional de Hidráulica-Universidad Nacional de Ingeniería, quien me motivo para iniciarme en el ámbito de la investigación.

La fase experimental de esta investigación fue financiada mediante aportes del Contrato N° 358-PNICP-PIAP-2014, firmado entre la UNI y el Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad del Ministerio de la Producción, INNOVATE PERU.

En la fase analítica se empleó el cluster de alto rendimiento Tipón, que fue financiado mediante el CONVENIO N° 257-INNOVATEPERU-EC-2016, "Adquisición de un servidor de alto rendimiento para investigar la dinámica de los flujos geofísicos y ambientales", firmado entre la UNI e INNOVATE PERU.

Agradezco al Dr. Julio Martín Kuroiwa Zevallos, actual Director del Laboratorio Nacional de Hidráulica por su apoyo y confianza brindada para redactar el artículo: 'SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA HIDRODINÁMICA Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL MODELO HIDRÁULICO DEL RÍO MADRE DE DIOS - TRAMO LA PASTORA', que fue enviado al **Congreso Latinoamericano de Hidráulica de Buenos Aires, Septiembre del 2018.**

Igualmente, también a los Dres: Pablo Tassi, Riadh Ata y Pat Prodanovic del **Laboratoire National d’Hydraulique et Environnement LNHE EDF–R&D (Francia)**, quienes me permitieron tener una pasantía y por el apoyo en el desarrollo de las simulaciones numéricas. En especial a Pat Prodanovic quien fue un amigo que me brindó su apoyo en mi estancia en el LNHE, asimismo a Adrien Bourgoin, Sofiane Martel.

Asimismo, agradecer a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y a la **Escuela de Ingeniería Mecánica de Fluidos**, donde inicié mi formación profesional. Agradecer al Ing. Bernardino Salvador quien me guió con el desarrollo de la presente tesis.

---

# Resumen

El río Madre de Dios, en el SE peruano, lleva una alta carga de sedimentos en suspensión y la tasa de migración lateral del cauce en el tramo estudiado es aproximadamente 6 m/año, generando fenómenos de socavación lateral en su margen derecha. El proyecto N° 358-PNICP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE, (2014) indica que, en el tramo curvo cerca de la ciudad de Puerto Maldonado, cuya longitud es aproximadamente 1540 metros, se está generando el colapso de la ribera dejando desprotegido el talud. Este fenómeno afecta a los inmuebles, sistemas de abastecimiento de agua y desagüe de la ciudad de Puerto Maldonado, y, de no haberse tomado medidas correctivas, hubiera puesto en riesgo más de 100 metros de la Carretera Interoceánica. La erosión lateral ha formado bancos de gran altura con taludes muy empinados. La verticalidad de los taludes hace que el banco sea más inestable ante una rápida variación del caudal. Para analizar el problema en 2014 se construyó el modelo hidráulico en el Laboratorio Nacional de Hidráulica – LNH.

Se construyó un modelo hidráulico de lecho móvil que representa el tramo La Pastora del río Madre de Dios a escala 1/60 en el Laboratorio Nacional de Hidráulica - LNH. El modelo hidráulico tiene una longitud de 50 m, un ancho medio,  $B$ , de 6.9 m, un radio de curvatura,  $R$ , de 13.8 m y un tirante máximo,  $y$ , de 0.25 m. Por lo tanto, la relación radio sobre ancho,  $R/B$ , es 2. El lecho móvil está compuesto de arena cuyo diámetro medio,  $d_{50}$  es 0.4 mm. Antes del inicio de las pruebas se ejecutó el levantamiento topográfico mediante escaneo láser 3D, procedimiento que se repitió al día siguiente de ejecutadas las pruebas para poder comparar la topografía del lecho antes y después de las pruebas. Cuatro bombas sumergibles permiten probar caudales de hasta 550 L/s que son transportados al modelo a través de tuberías de PVC de 356 mm (14”).

En la presente investigación se realizó la simulación numérica bidimensional del modelo hi-

dráulico del Río Madre de Dios (Tramo la Pastora) para analizar cualitativamente la dinámica del flujo secundario y del transporte de sedimentos empleando el módulo TELEMAC-2D (hidráulico) y SISYPHE (transporte de sedimentos) del sistema de código abierto Open TELEMAC-MASCARET, desarrollado por el Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement LNHE EDF-RD (Francia).

En la configuración del modelo numérico se construyó una malla triangular no estructurada con 12345 elementos y 4578 nodos, con un tamaño medio del elemento de 0.3 m. Las condiciones de contorno que se impusieron son:  $Q = 0.490$  m/s en el límite aguas arriba y el tirante inicial aguas abajo. Como condición inicial de profundidad de agua cero. La rugosidad que se prescribió fue de Manning 0.020. El esquema numérico que usa el programa es elementos finitos, la metodología de turbulencia que se usó es RANS (Reynolds Average Navier Stokes) y modelo de turbulencia k-epsilon. Además, dos parámetros fueron analizados para usar la corrección de flujo secundario en el modelo bidimensional que son el coeficiente de producción de flujo secundario ( $A_s$ ) que tiene un valor de 7.071 y el coeficiente de disipación de flujo secundario ( $A_{ds}$ ) donde su valor es 0.5, ambos parámetros fueron calibrados. Al usar ambos parámetros los resultados revelan que representa mejor el comportamiento del flujo en el tramo curvo que si no se usará.

Para analizar el transporte de sedimentos y evolución del lecho móvil se realizó una simulación de forma acoplada con el módulo hidrodinámico (TELEMAC-2D) y transporte de sedimentos (SISYPHE) donde el cálculo de las variables de ambos módulos se obtiene en cada iteración. En el módulo morfodinámico el transporte de sedimentos fue puramente advectivo y difusivo también se usó la corrección de pendiente del lecho y corrección de flujo secundario.

---

# Abstract

The Madre de Dios River, in the Peruvian SE, carries a high load of suspended sediments and the lateral migration rate of the riverbed in the studied section is approximately 6 m year<sup>-1</sup>, generating lateral undermining phenomena on its right bank. The INDECI report (2006) indicates that, in the curved section near the city of Puerto Maldonado, whose length is approximately 1540 meters, the collapse of the riverbank is being generated leaving the slope unprotected. This phenomenon affects the buildings, water supply and drainage systems of the city of Puerto Maldonado, and, had no corrective measures been taken, would have put more than 100 meters of the Interoceanic Highway at risk. Lateral erosion has formed high-rise benches with very steep slopes. The verticality of the slopes makes the bank more unstable in the face of rapid flow variation. To analyze this problem in 2014 built the hydraulic model at National Laboratory Hydraulic-LNH. A mobile bed hydraulic model was constructed that represents the La Pastora section of the Madre de Dios river at 1/60 scale at the National Hydraulics Laboratory - LNH. The hydraulic model has a length of 50 m, an average width,  $B$ , of 6.9 m, a radius of curvature,  $R$ , of 13.8 m and a maximum shoulder,  $and$ , of 0.25 m. Therefore, the ratio of radius to width,  $R / B$ , is 2. The moving bed is composed of sand whose average diameter,  $d_{50}$  is 0.4 mm. The topography was reconsidered using steel rods welded to a steel plate that was fixed to the bed. Before the start of the tests, the topographic survey was carried out using 3D laser scanning, a procedure that was repeated the day after the tests were executed in order to compare the topography of the bed before and after the tests. Four submersible pumps make it possible to test flow rates of up to 550 L / s that are transported to the model through 356 mm (14") PVC pipes. The flows enter two tanks of rectangular section and at the exit the flows can be measured by rectangular landfills. In each tank it was possible to measure by measuring the water level using Neyrpic limnimeters. The experience



---

in the experimental model lasted 24 hours, where the velocity, depth and bathymetry that were used to calibrate and validate the numerical model were collected. In the present investigation, the two-dimensional numerical simulation of the hydraulic model of the Madre de Dios River (La Pastora Section) was performed to qualitatively analyze the dynamics of the secondary flow and sediment transport using the TELEMAC-2D and SISYPHE module of the open source system Open TELEMAC-MASCARET, developed by the Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement LNHE EDF – R D (France). In the configuration of the numerical model, an unstructured triangular mesh was constructed with 12345 elements and 4578 nodes, with an average element size of 0.3 m. The boundary conditions that were imposed are:  $Q = 0.490 \text{ m}^3 / \text{s}$  at the upstream limit and the initial downstream tie. As initial condition of zero water depth. The roughness that was prescribed was Manning 0.020. The numerical scheme used by the program is finite elements, the turbulence methodology used is RANS (Reynolds Average Navier Stoke) and the k-epsilon turbulence model. In addition, two parameters were analyzed to use the secondary flow correction in the two-dimensional model which are the secondary flow production coefficient ( $As$ ) that has a value of 7.071 and the dissipation coefficient of for secondary flow ( $Ads$ ) where its value is 0.5 both parameters were calibrated. When using both parameters, the results reveal that it best represents the flow behavior in the curved section. To analyze sediment transport and evolution of the moving bed, it was carried out in conjunction with the hydrodynamic module (TELEMAC-2D) and sediment transport (SISYPHE) where the calculation of the variables of both modules is obtained at each iteration. In the morphodynamic module, sediment transport was purely advective and diffusive. Bed slope correction and secondary flow correction were also used.

---

# Índice general

<b>I. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción del problema . . . . .	1
1.2. Formulación del problema . . . . .	7
1.2.1. Problema general . . . . .	7
1.2.2. Problemas específicos . . . . .	8
1.3. Objetivos . . . . .	8
1.3.1. Objetivo general . . . . .	8
1.3.2. Objetivos específicos . . . . .	8
1.4. Justificación . . . . .	9
1.5. Metodología . . . . .	9
1.5.1. Acopio de Información . . . . .	10
1.5.2. Manejo del software Open TELEMAC . . . . .	10
1.5.3. Simulación numérica computacional . . . . .	10
1.5.4. Validación del modelo numérico computacional . . . . .	11
1.6. Motivación . . . . .	11
<b>II. Marco teórico</b>	<b>12</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	12
2.2. Métodos para describir el flujo de fluidos . . . . .	14
2.3. Fuerzas en un elemento de fluido . . . . .	16
2.4. Ecuaciones diferenciales de flujo de fluidos . . . . .	17
2.4.1. Ecuación de conservación de masa . . . . .	17
2.4.2. Ecuación de conservación de momentum . . . . .	18

---

2.4.3.	Ecuación de transporte . . . . .	21
2.4.4.	Métodos de solución numérica de las ecuaciones del flujo turbulento . . . . .	22
2.4.4.1.	Simulación numérica directa (DNS) . . . . .	22
2.4.4.2.	Simulación de grandes remolino (LES) . . . . .	22
2.4.4.3.	Metodología (RANS) . . . . .	23
2.5.	Transporte de sedimentos . . . . .	26
2.5.1.	Características físicas del sedimento . . . . .	26
2.5.2.	Fuerzas que actúan en la partícula de sedimento . . . . .	29
2.5.3.	Papel de la rugosidad efectiva . . . . .	31
2.5.4.	Inicio del movimiento del sedimento . . . . .	32
2.5.5.	Formas de transporte de sedimentos . . . . .	36
2.5.6.	Fórmulas de transporte de sedimentos no cohesivo . . . . .	38
2.5.6.1.	Meyer-Peter and Muller . . . . .	38
2.5.6.2.	Einstein y Brown . . . . .	39
2.5.6.3.	Engelund y Hansen . . . . .	41
2.5.6.4.	Van Rijn . . . . .	42
<b>III.</b>	<b>Modelo hidráulico del río Madre de Dios</b>	<b>43</b>
3.1.	Similitud entre el prototipo y modelo hidráulico . . . . .	43
3.2.	Descripción del modelo hidráulico del río Madre de Dios - Tramo la Pastora	46
3.2.1.	Detalles de replanteo del lecho del río Madre de Dios en el modelo hidráulico para el Tramo la Pastora . . . . .	47
3.2.2.	Granulometría del material del lecho . . . . .	47
3.2.3.	Caudal y tasa de transporte . . . . .	50
3.3.	Datos obtenidos durante los ensayos . . . . .	50
3.3.1.	Batimetría del lecho . . . . .	50
3.3.2.	Medición de las velocidades . . . . .	53
3.3.2.1.	Velocidad media . . . . .	57
3.3.2.2.	Tirantes . . . . .	61

---

---

<b>IV. Sistema Open TELEMAC MASCARET</b>	<b>62</b>
4.1. Descripción del software . . . . .	62
4.2. Características del sistema open TELEMAC MASCARET . . . . .	63
4.3. Entorno computacional . . . . .	64
4.4. Modulo hidrodinámico TELEMAC-2D . . . . .	65
4.5. Modulo de transporte de sedimentos SISYPHE . . . . .	68
4.5.1. Modificación de la magnitud y dirección de la carga del lecho . . . . .	70
4.5.1.1. Efecto de la pendiente del lecho . . . . .	70
4.5.1.2. Corrección del esfuerzo cortante en la dirección del flujo secundario . . . . .	71
4.5.1.3. La corrección del flujo secundario y la pendiente transversal del lecho debido a la gravedad . . . . .	74
4.5.1.4. Dirección del transporte de sedimentos . . . . .	74
4.6. Pre-procesamiento con QGIS y Blue Kenue . . . . .	75
4.6.1. Características de la batimetría . . . . .	76
4.6.2. Modelo digital del terreno (DEM) . . . . .	76
4.6.3. Características de la malla . . . . .	76
4.6.3.1. Malla bidimensional . . . . .	78
4.6.4. Condiciones de frontera . . . . .	78
4.6.4.1. Condición de frontera solida . . . . .	79
4.6.4.2. Condición de frontera liquida . . . . .	79
4.7. Técnicas numéricas usadas por el sistema Open TELEMAC MASCARET . . . . .	80
4.7.1. Esquemas numéricos . . . . .	80
4.7.2. Algoritmo de solución . . . . .	81
4.8. Post-Procesamiento . . . . .	83
 <b>V. Aplicación de TELEMAC-2D y SISYPHE en el modelo hidráulico del Río Madre de Dios - Tramo la Pastora</b>	 <b>84</b>
5.1. Delimitación del dominio . . . . .	84
5.1.1. Generación de la malla . . . . .	85

---

---

5.1.2.	Generación de los archivos de entrada de TELEMAC-2D . . . . .	89
5.1.2.1.	Generación del archivo de geometría .slf . . . . .	89
5.1.2.2.	Generación del archivo de condiciones de borde .cli . . . . .	90
5.1.3.	Archivos necesarios para ejecutar TELEMAC-2D . . . . .	92
5.1.3.1.	Descripción de los parámetros del archivo .cas . . . . .	92
5.1.4.	Ejecución de TELEMAC-2D . . . . .	95
5.1.5.	Configuración del módulo SISYPHE . . . . .	96
<b>VI.</b>	<b>Análisis de resultados de la simulación numérica</b>	<b>99</b>
6.1.	Calibración del módulo hidrodinámico . . . . .	99
6.1.1.	Comparación del resultado numérico y experimental de las velocidades	100
6.2.	Calibración del módulo morfodinámico . . . . .	112
	Conclusiones	119
	Recomendaciones	121

---

# Índice de figuras

1.1. Río Madre de Dios ubicado en la zona de estudio tramo 'La Pastora - Puerto Maldonado'. . . . .	3
2.1. Componentes de esfuerzo viscoso que actúan en un volumen de control. . . .	17
2.2. Entrada y salida de masa de flujo en un volumen de control. . . . .	18
2.3. Fuerzas superficiales que actúan en una partícula de fluido. . . . .	19
2.4. Fuerzas en la partícula de sedimento con lecho inclinado. . . . .	29
2.5. Fuerzas en la partícula de sedimento . . . . .	32
2.6. Fuerzas que actúan en la partícula de sedimento por Yang(1996) . . . . .	33
2.7. Parámetro de Shields con respecto al número de Reynolds de la partícula. . .	35
2.8. Variación de las dimensiones de la velocidad crítica. . . . .	36
3.1. Modelo hidráulico del río Madre de Dios - Tramo la Pastora construido en el Laboratorio Nacional de Hidráulica. . . . .	44
3.2. Prototipo del río Madre de Dios - Tramo La Pastora. . . . .	44
3.3. Curva granulométrica del modelo hidráulico del río Madre de Dios. . . . .	49
3.4. Configuración del lecho después de realizar el experimento, se observa el cambio de forma del lecho tipo duna. . . . .	51
3.5. Batimetría del lecho después de la etapa experimental, capturado por un Escaner Laser, la flecha indica la dirección del flujo . . . . .	51
3.6. Sección transversal S2, Ver Figura 3.5. . . . .	52
3.7. Sección transversal S4, Ver Figura 3.5. . . . .	52
3.8. Sección transversal S6, Ver Figura 3.5. . . . .	53

---

3.9. Sección transversal S8, Ver Figura 3.5. . . . .	53
3.10. Siete secciones transversales en planta y distribución de las velocidades en seis puntos medidos desde la margen derecha hacia la margen izquierda. . . . .	54
3.11. Las velocidades se midieron con Velocímetro Acústico Doppler en las siete secciones transversales . . . . .	55
3.12. Velocímetro Acústico Biestático está colocado a una distancia de 5cm por encima del lecho. . . . .	56
3.13. Registro y almacenamiento de las velocidades en una laptop para su posterior procesamiento . . . . .	56
3.14. Perfil de velocidad de la Sec1 en el plano x-y. . . . .	58
3.15. Perfil de velocidad de la Sec2 en el plano x-y, ver Figura 3.10. . . . .	58
3.16. Perfil de velocidad de la Sec3 en el plano x-y, ver Figura 3.10. . . . .	59
3.17. Perfil de velocidad de la Sec4 en el plano x-y, ver Figura 3.10. . . . .	59
3.18. Perfil de velocidad de la Sec5 en el plano x-y, ver Figura 3.10. . . . .	60
3.19. Perfil de velocidad de la Sec6 en el plano x-y, Figura 3.10. . . . .	60
3.20. Perfil de velocidad de la Sec7 en el plano x-y, ver Figura 3.10. . . . .	61
4.1. Módulos del software Open Telemac Mascaret. . . . .	63
4.2. Pendiente del lecho en el transporte del material de fondo y suspensión. . . . .	71
4.3. Muestra el flujo secundario helicoidal generado en la vertical debido a la fuerza centrífuga. . . . .	73
4.4. Representación de un elemento triangular 2D y número de nodos. . . . .	78
5.1. Dimensiones del domino físico. . . . .	85
5.2. Un total de 1239922 puntos vizualizado en el programa Klue Kenue. . . . .	86
5.3. Se realizó el resample (mismo distanciamiento entre nodos) del dominio . . . . .	86
5.4. Seleccionar la opción de T3 Mesh Generator . . . . .	87
5.5. Se selecciono la distancia entre nodos que es de 0.3 m . . . . .	87
5.6. Opción interpolacion (2D Interpolator) . . . . .	88
5.7. Asignarle elevación a la malla generada por medio de (Map Object) . . . . .	88
5.8. Archivo SELAFIN Object. . . . .	89

---

---

5.9. Archivo Boundary Conditions (Conlim) aguas arriba. . . . .	90
5.10. Archivo Boundary Conditions (Conlim) aguas abajo. . . . .	91
5.11. Condiciones de frontera (Boundary Conditions) inflow $Q [m^3/s]$ y outflow $H [m]$ . . . . .	91
5.12. Descripción del archivo .cas de TELEMAC2D. . . . .	94
5.13. Uso de los coeficientes de flujo secundario y esquema numérico . . . . .	95
5.14. Archivo de extensión .cas para el módulo morfodinamico. . . . .	96
5.15. Características físicas de la partícula de sedimento. . . . .	97
5.16. Acoplamiento del módulo hidrodinámico (TELEMAC-2D) y transporte de sedimentos (SISYPHE). . . . .	98
5.17. Algoritmo de solución para el módulo de transporte de sedimentos . . . . .	98
6.1. Perfil de velocidad en el plano x-y, se muestra que al considerar la corrección de flujo secundario se aproxima a los datos experimentales. . . . .	101
6.2. Coeficiente de correlación entre los datos obtenidos de la simulación numérica y datos experimentales . . . . .	101
6.3. Perfil de velocidad en el plano x-y, se muestra al considerar la corrección de flujo secundario se aproxima a los datos experimentales. . . . .	102
6.4. Coeficiente de correlación entre los datos obtenidos de la simulación numérica y datos experimentales. . . . .	103
6.5. Perfil de velocidad en el plano x-y, se muestra al considerar la corrección de flujo secundario se aproxima a los datos experimentales. . . . .	104
6.6. Coeficiente de correlación entre los datos obtenidos de la simulación numérica y datos experimentales. . . . .	104
6.7. Perfil de velocidad en el plano x-y, se muestra al considerar la corrección de flujo secundario se aproxima a los datos experimentales. . . . .	105
6.8. Coeficiente de correlación entre los datos obtenidos de la simulación numérica y datos experimentales. . . . .	106
6.9. Perfil de velocidad en el plano x-y, se muestra al considerar la corrección de flujo secundario se aproxima a los datos experimentales. . . . .	107

---



---

6.10. Coeficiente de correlación entre los datos obtenidos de la simulación numérica y datos experimentales . . . . .	107
6.11. Perfil de velocidad en el plano x-y, se muestra al considerar la corrección de flujo secundario se aproxima a los datos experimentales. . . . .	108
6.12. Coeficiente de correlación entre los datos obtenidos de la simulación numérica y datos experimentales. . . . .	109
6.13. Perfil de velocidad en el plano x-y, se muestra al considerar la corrección de flujo secundario se aproxima a los datos experimentales. . . . .	110
6.14. Coeficiente de correlación entre los datos obtenidos de la simulación numérica y datos experimentales. . . . .	110
6.15. Se muestra las velocidades máximas en el tramo curvo, donde la velocidad está en el rango de 0-0.5m/s . . . . .	111
6.16. Comparación de secciones transversales con la batimetría antes y después del experimento y el resultado del modelo numérico. (Sección S2) . . . . .	113
6.17. Comparación de secciones transversales con la batimetría antes y después del experimento y el resultado del modelo numérico. (Sección S4) . . . . .	113
6.18. Comparación de secciones transversales con la batimetría antes y después del experimento y el resultado del modelo numérico. (Sección S6) . . . . .	114
6.19. Comparación de secciones transversales con la batimetría antes y después del experimento y el resultado del modelo numérico. (Sección S8) . . . . .	114

---

# Índice de tablas

1.1. Estadística del cambio de canal a lo largo de cuatro ríos en la Amazonía peruana antes de 1992 . . . . .	2
3.1. Relación de escalas Modelo - Prototipo . . . . .	45
3.2. Porcentaje que pasa o es retenido por los tamices. . . . .	48
3.3. Velocidades medias en seis puntos de cada sección transversal . . . . .	57
3.4. Tirantes en seis puntos en las secciones 1,2 hasta 7 medidos desde la margen izquierda hacia la margen derecha . . . . .	61
6.1. Datos de la velocidad en la sección 1 [sec1] . . . . .	100
6.2. Parámetros Estadísticos. . . . .	102
6.3. Datos de la velocidad en la sección 2 [sec2] . . . . .	102
6.4. Parámetros Estadísticos. . . . .	103
6.5. Datos de la velocidad en la sección 3 [sec3] . . . . .	103
6.6. Parámetros Estadísticos. . . . .	105
6.7. Datos de la velocidad en la sección 4 [sec4] . . . . .	105
6.8. Parámetros Estadísticos. . . . .	106
6.9. Datos de la velocidad en la sección 5 [sec5] . . . . .	106
6.10. Parámetros Estadísticos. . . . .	108
6.11. Datos de la velocidad en la sección 6 [sec6] . . . . .	108
6.12. Parámetros Estadísticos. . . . .	109
6.13. Datos de la velocidad en la sección 7 [sec7] . . . . .	109
6.14. Parámetros Estadísticos. . . . .	111

# Capítulo I

## Introducción

### **Resumen:**

*En este capítulo se describe el problema que afecta a ríos meándricos y cómo la erosión lateral afecta al río Madre de Dios en tramo la Pastora. Debido a la magnitud del problema se construye un modelo hidráulico en el Laboratorio Nacional de Hidráulica - UNI.*

### 1.1. Descripción del problema

Los ríos de la selva peruana presentan cauces con pendientes bajas, las aguas discurren en un suelo aluvial y los caudales varían dependiendo de la época del año, y sus cursos son: anastomosados, trenzados y meándricos, constituidos por curvas alternadas en forma de S. Sioli et al.(1984), señalan que los ríos amazónicos a menudo se dividen en tres categorías: en función a sus propiedades físicas, composición química de sus aguas y en la práctica de acuerdo con el transporte de sedimentos en suspensión y fondo.

La tasa de erosión lateral (migración) es más rápido en los ríos de la Selva Baja. Una medida de cómo los ríos han migrado es observando y comparando imágenes satelitales en el tiempo. Por ejemplo Puhakka *et al.* (1992), utilizaron imágenes satélites Landsat MSS para observar la migración lateral de algunos ríos de la selva peruana. Ellos observaron las estadísticas de cambio del canal a lo largo de cuatro ríos (Amazonas, Marañón, Ucayali y Manu) en la amazónica peruana, en un período de 4 años. Las observaciones señalan que el río Amazonas, de tipo anastomosado, presenta tasa promedio de erosión lateral de 115 m/año, con un

máximo de erosión de 300 m/año y un total de área erosionada de 803.3 ha/año. El río Ucayali presenta tasas máximas de erosión de 150 m/año ; y el río Manu, que tiene canales meándrico, presenta una tasa promedio de erosión lateral de 12 m/año. La tasa máxima de erosión del río Manu fue de 70 m/año y un área total erosionada de 0.93 ha/año ver Tabla (1.1).

Tabla 1.1: Estadística del cambio de canal a lo largo de cuatro ríos en la Amazonía peruana antes de 1992

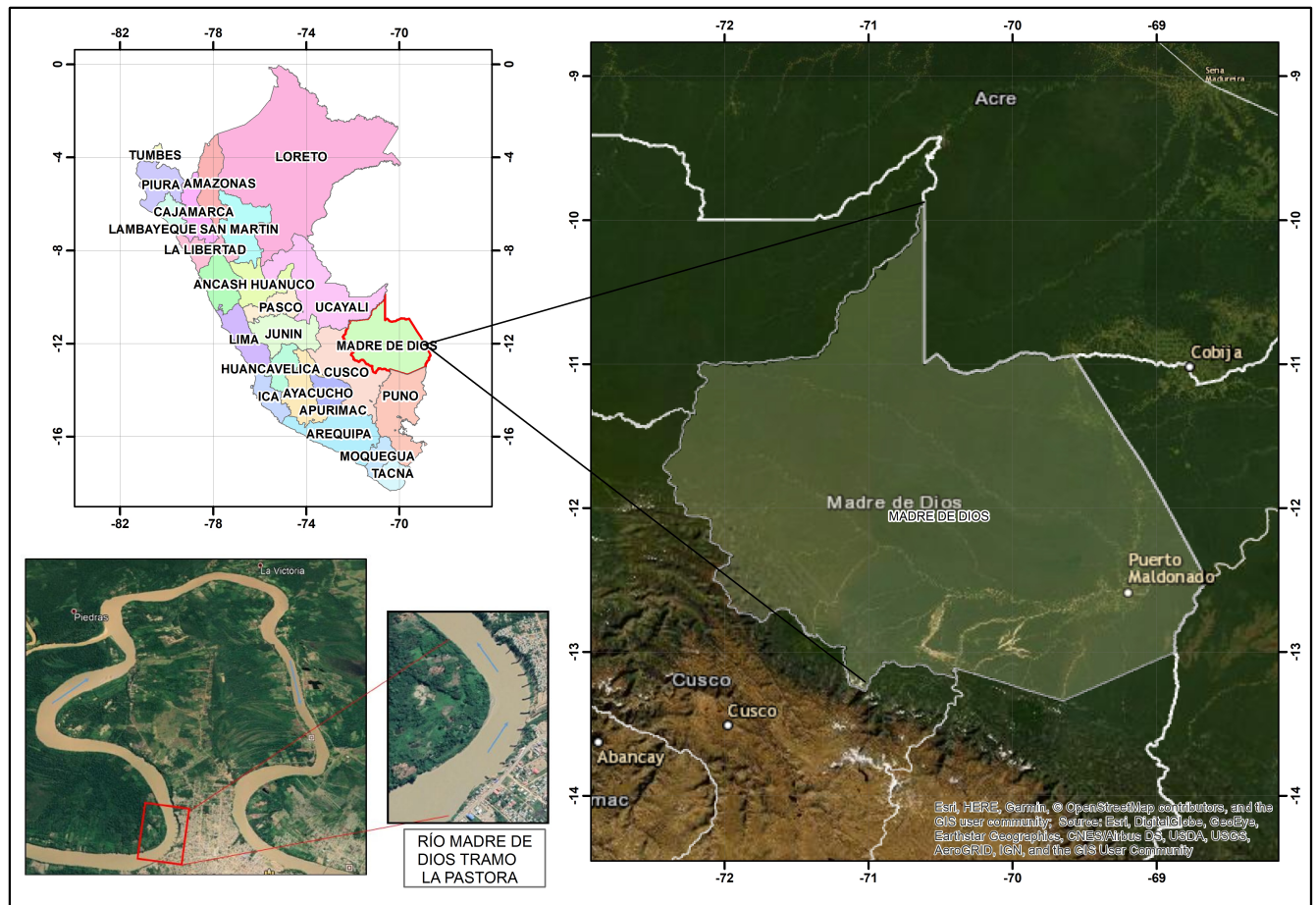
Descripción	Amazonas	Marañon	Ucayali	Manu
Tipo de canal	anastomosado	anastomosado	meándrico	meándrico
Longitud de faja meándrica (km)	110	90	110	70
Sinuosidad	1.5	1.2	1.9	2.1
Ancho del canal min-max.(km)	4	4	4	14
Tasa de erosión lateral promedio(m/año)	115	110	78	12
Tasa máxima de erosión lateral(m/año)	300	200	150	70
Mayor unidad erosionada ( $km^2$ /año)	1.5	0.4	0.5	0.03
Área total de Erosión (ha/año)	803.3	268.2	261.7	0.93
Número de unidades de bosque erosionada	6.5	4	5.2	13.1

**Fuente:** Estudio de Línea de Base – FINCyT.

La erosión lateral es un fenómeno natural que se presenta en casi todos los ríos tropicales; sin embargo, en los últimos años estos procesos se han acelerado por causas antropogénicas, produciendo destrucción de las riveras, cauces y planicies de inundación. Una causa ha sido

la “fiebre de oro” que desde la década de los 70 ha llevado a centenares de miles de mineros a buscar oro en los ríos provocando serios impactos en los ecosistemas fluviales más complejos y diversos de la selva peruana. La minería aurífera en suelos aluviales de la Amazonía se está expandiendo rápidamente en los últimos años más que en cualquier época histórica. (Indeci, 2006).

Figura 1.1: Río Madre de Dios ubicado en la zona de estudio tramo 'La Pastora - Puerto Maldonado'.



*Fuente: Google Earth(2018), elaboración propia.*

En el cauce principal del río Madre de Dios hay una alta carga de sedimentos en suspensión y la tasa de erosión lateral del canal es aproximadamente 6 m/año generando fenómenos de socavación lateral en la margen derecha del río. En el tramo curvo cerca de la ciudad de Puerto Maldonado, que tiene una longitud de más de 1540 m, se está generando el colapso de la ribera dejando desprotegido el talud. La erosión lateral afectará a los inmuebles, sistema de

abastecimiento de agua y desagüe de la ciudad de Puerto Maldonado, y en el futuro pondrá en riesgo más de 1 km de la carretera interoceánica. Así mismo ha dejado a los bancos con taludes muy empinados, la verticalidad en los taludes hace que los bancos sean más inestables ante el paso de cualquier incremento y disminución del caudal, generando la caída de grandes masas de suelo debido a que el material es muy fácil de desprenderse, ya que la mayoría de estos bancos presentan suelos finos como: arcillas, limos y arenas. Los bancos erosionados presentan una pendiente inclinada, que en algunos tramos van desde los  $56^0$  hasta  $90^0$ .

Para proteger las riberas de los ríos existen estructuras de estabilización que mitigan la erosión lateral de los canales aluviales. Los métodos de estabilización de ríos pueden ser clasificados bajo dos enfoques:

- Fortalecimiento de la ribera.
- Reducción de las fuerzas.

De acuerdo a Julien (2002) ambos enfoques son necesarios para mitigar los efectos de la erosión lateral en los ríos Amazónicos ya que sus riberas están compuestas de materiales que son muy fácil de erosionarse, y como la geometría en planta del río es curvo, genera flujos altamente tridimensionales que ayudan aún más a erosionar los bancos débiles. Es por esto que, si se reduce las fuerzas hidrodinámicas, la erosión lateral podría ser mitigada. Las estructuras de control de flujo son diseñadas para reducir las fuerzas hidrodinámicas que impactan en las riberas mediante el control de la dirección del flujo, la velocidad o del tirante del agua que fluye.

Conocer la morfología de un río meandrónico es fundamental para plantear soluciones técnicas adecuadas en el diseño y construcción de obras fluviales. El comportamiento morfológico se puede estudiar en un modelo hidráulico, o implementando un modelo numérico hidrodinámico y de transporte de sedimentos. Estos modelos, que casi siempre son complementarios, ayudan a entender, reproducir y predecir los procesos físicos que ocurren en un río, y así constituyen herramientas muy valiosas para el diseño hidráulico y estructural de las obras fluviales.

El modelamiento hidráulico o numérico de transporte de sedimento, de por sí es difícil aún para canales artificiales prismáticos y, con mayor razón, lo es para ríos. Si un río presenta

curvatura, el modelamiento en el tramo curvo presenta mayor dificultad lo cual no es posible predecir con un modelo numérico bidimensional. Un río meandrónico por naturaleza presenta tramos con curvatura. En consecuencia, el modelamiento de transporte de sedimento en tramos curvos es un problema de mayor complejidad. En general, el transporte se caracteriza por un alto nivel de sedimentación en el banco interior y una marcada erosión en el banco exterior. Esta dinámica se traduce finalmente en un movimiento horizontal, o migración lateral, del cauce del río.

El problema de la migración de los ríos, se debe a la presencia de flujos secundarios en la sección del tramo curvo. Las corrientes secundarias superficiales, y las que se encuentran cerca del lecho, generan el fenómeno de erosión en un banco y sedimentación al otro lado, un fenómeno de naturaleza tridimensional donde se presentan flujos helicoidales que empiezan cuando el agua entra en el tramo con curvatura del cauce.

El estudio en el modelo hidráulico llevado a cabo en el Laboratorio Nacional de Hidráulica de la Universidad Nacional de Ingeniería, para condiciones sin estructuras de protección ribereña del tramo del río Madre de Dios se pudo observar que los efectos y la fuerza del flujo secundario varía considerablemente. Esto también se puede apreciar con una simple relación del radio de curvatura local y el ancho del canal, haciendo que este tramo del río presente una alta curvatura que induce flujo helicoidal o tridimensional con altas velocidades, alta turbulencia y altos esfuerzos cortantes que producen erosión en el lecho del río; por otro lado, se hace aún más complicado en los casos donde la batimetría o geometría del río es muy compleja. El modelo hidráulico del tramo del río Madre de Dios permitió comprender los fenómenos presentes en este río, pero es necesario utilizar un modelo numérico para complementar la investigación, ya que los equipos empleados miden de forma puntual los datos. Un modelo numérico puede explorar mejor la física del problema además su costo es menor comparado con un modelo físico y las simulaciones numéricas de alta resolución podrían ayudar entender dichos fenómenos.

La turbulencia en el tramo de estudio es usualmente bastante fuerte debido a los límites irregulares, aunque no podamos observar visualmente la turbulencia interna que está generando altos esfuerzos de corte cerca del lecho y en la superficie libre. Por otro lado, la relación del transporte de sedimentos de fondo con el transporte de sedimentos en suspensión es de  $1/10$ ,

este valor podría deberse a una alta turbulencia que mantiene a las partículas en suspensión. Visualizar y cuantificar la turbulencia es casi imposible ya que es un fenómeno muy complejo, que está acompañado de vórtices tridimensionales que en su mayoría descienden hacia el fondo del río y que varían en el tiempo.

En general, en cuanto a estudios en proyectos hidráulicos, un estudio numérico es una herramienta que nos puede ayudar a complementar los estudios experimentales llevados a cabo en laboratorio. Los modelos hidráulicos son muy caros, demandan mucho tiempo en la construcción, calibración y toma de datos, por otro lado, los estudios de campo tampoco son fáciles de llevar a cabo, sobre todo no se puede tomar datos debido a la complejidad, variación en el tiempo y los diversos parámetros que resultan difíciles de medir. En este contexto la simulación numérica es una herramienta que presenta ventajas.

#### ■ Meanderización de ríos

Los ríos meándricos se caracterizan por una sucesión de bucles curvos alternados, cada bucle es un tramo del río entre dos puntos de inflexión; y un meandro consiste en un par de bucles en dirección opuesta.

Numerosas hipótesis se han planteado para explicar la razón de la meanderización, siendo éste un fenómeno en el cual la vorticidad juega un papel muy importante. Al observar el fenómeno desde el punto de vista de la circulación de flujos secundarios en el tramo curvo, la meanderización es generada a través de un cambio en la orientación del río aguas abajo. Aquí las líneas de corriente cerca de la superficie son deflectadas hacia el banco exterior, mientras las que están cerca del lecho son desviadas al banco interno. La velocidad cerca al lecho, el esfuerzo cortante tangencial del lecho y el arrastre de las partículas es generalmente direccionada hacia el banco interno produciéndose erosión cerca al banco externo y sedimentación en el banco interno.

La migración de un río meándrico es el resultado de la erosión del banco externo combinado con la sedimentación cerca del banco interno. La erosión en el pie del banco externo desplaza el thalweg hacia fuera del río curvo y causa empinamiento del banco externo. El incremento del empinamiento del material del banco externo es una de las causales de falla.

Las fallas en los bancos pueden ser caracterizados por la forma de la superficie de falla



o por el modo de falla. Por la superficie de la falla puede ser rotacional o plana.

Las fallas rotacionales son perjudiciales por que ocasionan pérdidas de tierra y por lo general son menos comunes a lo largo de las riberas (Simon, 1989); en este tipo de falla la tensión de cizallamiento aumenta más rápidamente con la profundidad que realiza la resistencia al corte (Terzaghi *et al.*, 1996).

Las fallas planas generalmente resultan de la erosión en la parte inferior de la ribera o el desarrollo de una grieta de tensión casi vertical en la parte superior del banco (Lohnes, 1968).

#### ■ Modos de falla típicos en los ríos aluviales

Las fallas en los bancos se han reportado con mayor frecuencia durante el periodo de crecida. Existen tres modos de falla típicos en los ríos aluviales:

- a) Con material granular no cohesivo: la pérdida de granos al pie del banco exterior induce el deslizamiento del material granular, tan pronto al ángulo de inclinación excede el ángulo de reposo del material.
- b) Con material cohesivo: la falla rotacional es típica y la presencia de la tensión de corte podría acelerar los procesos de erosión del banco.
- c) Con depósitos estratificados: el material no cohesivo suprayacente es movilizado, dejando así el material cohesivo suprayacente sujeto a la tensión de grietas y fallas en voladizo. En general, los bancos más erosivos son los que están compuesto de arena y limo, mientras que los menos erosivos de arcilla y grava.

## 1.2. Formulación del problema

### 1.2.1. Problema general

¿Es posible simular numéricamente la dinámica del flujo secundario helicoidal y del transporte de sedimentos en el tramo curvo de un cauce de lecho móvil, tal como el modelo hidráulico del río Madre de Dios?

---

### 1.2.2. Problemas específicos

- ¿Es posible simular numéricamente las características del flujo helicoidal que se forma en la sección transversal del tramo curvo del modelo hidráulico del río Madre de Dios?
- ¿De qué manera afecta el flujo helicoidal a las riberas del tramo curvo del cauce del modelo hidráulico del río Madre de Dios?
- ¿De qué manera afecta el flujo helicoidal a la dinámica del transporte de sedimentos en el tramo curvo del modelo hidráulico del río Madre de Dios?
- ¿Es posible simular numéricamente la configuración del proceso de erosión-sedimentación en la sección transversal del tramo curvo del modelo hidráulico del río Madre de Dios?

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Realizar una simulación numérica de la dinámica del flujo secundario helicoidal y del transporte de sedimentos en un tramo curvo del modelo hidráulico del Río Madre de Dios, para analizar la influencia del flujo secundario en la morfología del lecho.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Simular numéricamente las características del flujo helicoidal que se forma en la sección transversal del tramo curvo del modelo hidráulico del río Madre de Dios.
  - Interpretar los efectos del flujo helicoidal sobre las riberas del tramo curvo del modelo hidráulico del río Madre de Dios.
  - Interpretar los efectos del flujo helicoidal en la dinámica del transporte de sedimentos en un tramo curvo del modelo hidráulico del río Madre de Dios.
  - Simular numéricamente la configuración del proceso de erosión y sedimentación en la sección transversal del tramo curvo del modelo hidráulico del río Madre de Dios.
-

---

## 1.4. Justificación

Debido al acelerado proceso de erosión lateral en ríos meándricos es necesario comprender la dinámica del flujo y el transporte de sedimentos en este tipo de ríos, ya que en muchos de ellos se proyectan estructuras hidráulicas los cuales se ven afectadas por el proceso de transporte de sedimentos. En el caso específico del río Madre de Dios, la migración lateral afecta a los inmuebles aledaños, al sistema de abastecimiento de agua y desagüe y a la carretera interoceánica que pasa por la ciudad de Puerto Maldonado.

Por otro lado, la simulación numérica constituye una ayuda para analizar el flujo helicoidal y el proceso de transporte de sedimentos cerca de las riberas empinadas de ríos con tramos curvos. Por lo tanto, con esta herramienta numérica se puede simular el fenómeno de migración lateral que se presenta en ríos meándricos, estimar su magnitud y, de ser el caso, analizar alternativas de mitigación.

La principal contribución de este trabajo es mostrar que en un río meándrico, se presenta flujo secundario tridimensional. En situaciones de este tipo es importante usar la corrección de flujo secundario en modelos numéricos bidimensionales con el objetivo de parametrizar las variables en la vertical o usar un modelo numérico tridimensional.

## 1.5. Metodología

La simulación numérica de flujo secundario helicoidal y transporte de sedimentos, se ha realizado resolviendo las ecuaciones de conservación de momentum lineal y de continuidad, complementada con fórmulas empíricas y semi-empíricas del transporte de sedimentos en ríos. Estas ecuaciones están implementadas en el software libre de código abierto denominado Open TELEMAC MASCARET. Los resultados de la simulación numérica se ha contrastado con la información obtenida en el modelo hidráulico del río Madre de Dios realizado en el Laboratorio Nacional de Hidráulica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

Durante el desarrollo de la tesis se ha seguido los siguientes pasos:

### 1.5.1. Acopio de Información

Revisión de bibliografía general sobre el tema, con énfasis sobre la dinámica de fluidos computacional. La revisión bibliográfica abarcó trabajos de tesis, artículos de investigación, monografías y otros estudios realizados sobre: hidrodinámica de canales curvos, transporte de sedimentos en canales curvos, desarrollo y evolución de lechos móviles. Asimismo, abarcó búsqueda del tema en páginas de internet y acopio de información relacionado con el software de simulación, etc.

Acopio y sistematización de datos obtenidos en los ensayos del modelo hidráulico del río Madre de Dios, de escala lineal de 1:60, realizado en el Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH-UNI), donde se recolectaron datos de velocidad, tirante y se escaneó la topografía del modelo hidráulico antes y después del ensayo experimental, estos datos permitieron validar el modelo numérico usado.

### 1.5.2. Manejo del software Open TELEMAC

Se recopiló el manual de usuario y “demos” del software Open TELEMAC MASCARET. Se analizó el método de discretización utilizado, tanto del dominio (enmallado), como de las ecuaciones involucradas. Se identificó las ecuaciones discretizadas en el software, tanto del módulo hidrodinámico como del módulo de transporte de sedimentos. Se realizó simulaciones con los módulos TELEMAC-2D y SISYPHE para casos simples o hipotéticos, con la finalidad de obtener pericia en el manejo de los módulos.

Se adecuó, las ecuaciones del software (Open TELEMAC MASCARET) para el estudio del problema objetivo. Estos pasos comprendieron tanto al módulo hidrodinámico como al módulo de transporte de sedimentos.

### 1.5.3. Simulación numérica computacional

Este paso consistió en:

- Delimitar el dominio computacional en programa Blue Kenue.
- Generación de la malla computacional no estructurada, con un espaciamiento de 0.3 m.

Asignar las condiciones de frontera aguas arriba (caudal) y aguas abajo (tirante), además generar los archivos de extensión .cli y .slf, que son los archivos necesarios para la simulación.

- Descargar el archivo de extensión .cas de la pagina web [www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org), que tiene todos los parametros hidráulicos como: (Rugosidad, time de paso, etc).
- Se realizar la simulación hidrodinámica con TELEMAC-2D para generar el archivo hort-start.slf que contiene resultados de las variables hidrodinámicas, necesarios para inicializar las variables y hacer la simulación de forma acoplada.
- Simular, de forma acoplada con el modulo TELEMAC-2D y SISYPHE empleando los archivos de condición de frontera (.cli), malla computacional (.slf), el archivo .cas y el hort-start generado previamente. Además, realizar analisis de sensibilidad para diferentes pasos de tiempos (time-steps) hasta obtener resultados coherentes.
- Con los resultados obtenidos hacer el post-proceso para contrastar con los datos experimentales obtenidos del modelo hidráulico. (Ver capitulo 6)

#### 1.5.4. Validación del modelo numérico computacional

Se realizó la validación del modelo numérico con los resultados experimentales obtenidos en el modelo hidráulico del río Madre de Dios tramo la Pastora, (ver ítem 1.5.1).

### 1.6. Motivación

El interés por realizar el presente trabajo surgió cuando tuve la oportunidad de realizar prácticas pre-profesionales en el Laboratorio Nacional de Hidráulica que se encuentra en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), donde participe durante los ensayos y en procesamiento de datos del modelo hidráulico del rio Madre de Dios.

Por otro lado, en el Laboratorio Nacional de Hidráulica se presentó la oportunidad de usar el software Open TELEMAC MASCARET para resolver las ecuaciones de flujo de fluidos y las ecuaciones empíricas del transporte de sedimentos.

# Capítulo II

## Marco teórico

### **Resumen:**

*En este capítulo se describe las ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido, transporte de sedimento y sus propiedades.*

### 2.1. Antecedentes

La simulación numérica de la hidrodinámica, transporte de sedimentos y la morfología de lecho de ríos son temas relativamente reciente y va emparejado con el avance de la tecnología de la computación y el desarrollo de métodos numéricos, sin estas herramientas sería casi imposible abordar el tema.

Las ecuaciones que gobiernan a los citados temas son ecuaciones tridimensionales, no permanentes y en derivadas parciales, por lo que su solución es vía la simulación numérica.

Existen varios software de simulación hidrodinámica y transporte de sedimentos, los más conocidos en el mundo académico e industrial, que son libres y validados, son: open TELEMAC MASCARET, y DELFT-3D (versión estudiantil).

A la fecha, Open TELEMAC MASCARET tiene la última version v8p0 y cuenta con la version 2D, 3D y el modulo de transporte de sedimentos.

Open TELEMAC fue desarrollado por el Laboratoire National de Hydraulique y Medio Ambiente del departamento de la División de Investigación y Desarrollo de Electricidad de Francia, (Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement - LNHE, Recherche et Dévelop-

pement de Électricité de - EDF - R & D) Francia.

El código TELEMAC-2D resuelve ecuaciones de flujo de superficie libre promediadas en la profundidad (ecuaciones de Saint Venant). La principal aplicación de TELEMAC- 2D está en hidráulica marítima e hidráulica fluvial y tiene en cuenta los siguientes fenómenos:

- Turbulencia.
- Flujo subcrítico y supercrítico.
- Influencia de la temperatura horizontal y gradiente de la salinidad en la densidad.
- Planicies de marea y llanura de inundación.
- Tratamiento de singularidades: vertederos, diques y alcantarillas.
- Transporte de sedimentos.

A continuación, se presenta los antecedentes internacionales más próximos en el estudio de la dinámica del flujo secundario helicoidal y del transporte de sedimentos en el tramo curvo de ríos, especialmente los que han empleado el software Open TELEMAC MASCARET:

- Villaret *et al.* (2013), en un artículo titulado **“Morphodynamic modeling using the Telemac finite-element system”** describen que la principal originalidad del sistema de código abierto open TELEMAC MASCARET radica en la eficiencia y la flexibilidad de los elementos finitos, además de la optimización de esquemas numéricos, con el progreso en el rendimiento de los ordenadores.
- Morell *et al.* (2014) elaboraron un estudio bajo el título **“Flow pattern at a river diffuence at the alluvial system of the Paraná River”**, en la ciudad de Santa Fe, (476 km al noroeste de Buenos Aires). El objetivo del estudio fue mostrar el patrón de flujo desarrollado en la difluencia y plantearon una solución al problema de sedimentación crónica visto en la entrada del canal de acceso. Para dicho estudio utilizaron el software Open TELEMAC MASCARET.
- Tassi (2014), en un artículo titulado **"Flow and bed morphology in large-amplitude meanders, comparison of two and three-dimensional numerical models"**, presentó la simulación bidimensional y tridimensional del flujo en canales meandricos de

gran amplitud empleando la metodología RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes), basado en los estudios de Whiting y Dietrich. En la simulación demostraron que con el modelo bidimensional (profundidad promediada) no es posible tener en cuenta efectos tridimensionales.

- Riesterer *et al.* (2016) presentaron un artículo titulado “**Bed load transport modeling of a secondary flow influenced curved channel with 2D and 3D numerical models**”. Los autores realizaron simulación numérica de un canal meándrico de laboratorio, donde se analizaron la influencia del flujo secundario en el desarrollo del lecho y en el transporte de carga de fondo del canal. Además, realizaron la comparación de la resolución espacial de la simulación hidrodinámica, llevado a cabo con software open TELEMAC MASCARET.

En el ámbito nacional no se ha encontrado trabajos relacionados al tema.

## 2.2. Métodos para describir el flujo de fluidos

Existen dos diferentes enfoques de descripción del movimiento de los fluidos: Euleriano y Lagrangiano.

El enfoque Euleriano analiza el movimiento del fluido mediante un elemento fluido infinitesimal o volumen de control que es fijo en el espacio. Este es el enfoque más común ya que el interés generalmente está en la variación de las propiedades físicas (por ejemplo, presión, densidad, temperatura y velocidad) en un punto fijo en el espacio en lugar de los puntos en movimiento. En este enfoque las ecuaciones gobernantes se obtienen directamente del elemento fluido infinitesimal o volumen de control mediante la aplicación de principios fundamentales (por ejemplo: continuidad, Segunda Ley de Newton, Primera Ley de la Termodinámica) y se expresa en ecuaciones diferenciales parciales. El enfoque Euleriano da lugar a la forma conservativa de las ecuaciones gobernantes del fluido (Versteeg, 1995).

El enfoque Lagrangiano rastrea las propiedades físicas (por ejemplo: densidad, presión, temperatura y velocidad) de una partícula fluida mientras se mueve a través del elemento de fluido. En este enfoque las ecuaciones de flujo de fluidos son directamente obtenidos desde el



elemento fluido infinitesimal aplicando principios fundamentales de ecuaciones diferenciales parciales.

El enfoque Lagrangiano da lugar a la "forma no-conservativa" de las ecuaciones gobernantes del fluido (Versteeg, 1995).

### ■ Derivada material

La derivada material se usa para describir el cambio de las propiedades de una partícula fluida. Cualquier propiedad  $\phi$  de una partícula por unidad de masa es usualmente una función de su posición y del tiempo  $t$   $\phi(x, y, z, t)$ . La tasa de cambio de esta propiedad  $\phi$  de una partícula fluida con respecto al tiempo  $(\frac{D\phi}{Dt})$ , es llamado derivada material (White, 1991), derivada total o sustancial (Anderson & Wendt, 1995), derivada absoluta (Chanson, 1999).  $(\frac{D\phi}{Dt})$  puede ser presentado matemáticamente por el enfoque Lagrangiano utilizando la expansión en la serie de Taylor sin considerar los términos de orden superior, o como en el presente caso, empleando la regla de la cadena del cálculo diferencial.

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{d\phi}{dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial\phi}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial\phi}{\partial z} \frac{dz}{dt} \quad (2.1)$$

Dado que una partícula de fluido sigue la línea de corriente,  $\frac{dx}{dt} = u$ ,  $\frac{dy}{dt} = v$  y  $\frac{dz}{dt} = w$ , con lo que resulta:

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial\phi}{\partial t} + u \cdot \nabla\phi = \frac{\partial\phi}{\partial t} + u \cdot \text{grad}\phi \quad (2.2)$$

En la ecuación (2.2) el término  $\frac{\partial\phi}{\partial t}$  es llamado "derivada local". El cual físicamente es la tasa de cambio de alguna propiedad  $\phi$  con respecto al tiempo en un punto fijo o elemento fluido. El término  $u \cdot \text{grad}\phi$  es la derivada advectiva. El cual físicamente es la tasa de cambio de alguna propiedad  $\phi$  debido al movimiento del elemento fluido de un punto a otro en el campo de flujo donde las propiedades son espacialmente diferentes. Es importante notar que  $\frac{D\phi}{Dt}$  indica la tasa de cambio de una propiedad  $\phi$  por unidad de masa. Por lo tanto debe ser multiplicado por la densidad del fluido  $\rho$  para obtener la tasa de cambio de alguna propiedad  $\phi$  por unidad de volumen. La tasa de cambio de la propiedad  $\phi$  por unidad de volumen de un elemento fluido está dado por la ecuación:

$$\rho \frac{D\phi}{Dt} = \rho \frac{\partial\phi}{\partial t} - u \cdot \nabla(\rho\phi) \quad (2.3)$$

En otras palabras, la derivada material establece que la tasa de incremento de cualquier propiedad  $\phi$  de un elemento fluido por unidad de volumen es igual a la tasa de incremento de cualquier propiedad  $\phi$  de una partícula fluida (moviéndose a través del elemento) por unidad de volumen, menos la tasa neta de  $\phi$  fuera del elemento fluido por unidad de volumen.

Las ecuaciones de momento y energía se derivan usando el concepto de derivada material.

## 2.3. Fuerzas en un elemento de fluido

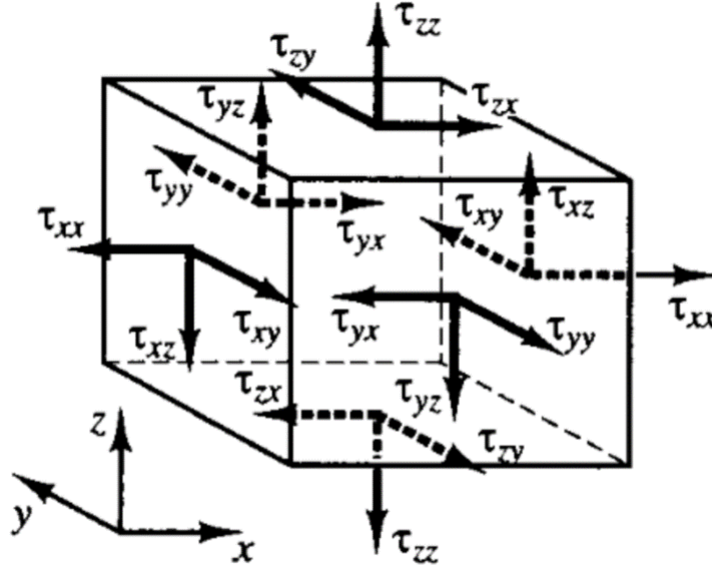
Hay dos tipos diferentes de fuerzas que actúan en el volumen de control (Anderson & Wendt, 1995).

- **Fuerzas volumétricas:** actúan directamente sobre la masa volumétrica del elemento fluido. Estas fuerzas actúan a una distancia de la superficie, por ejemplo la fuerza gravitacional, centrífuga, coriolis y fuerzas electromagnéticas.
- **Fuerzas superficiales:** actúan directamente sobre la superficie del elemento fluido. Estas fuerzas se deben a la distribución de la presión impuesta por el fluido exterior que rodea el elemento fluido, que actúa a través de los esfuerzos normales y la distribución del esfuerzo viscoso impuesto por el fluido externo en la superficie por medio de la fricción.

Por simplicidad la contribución debido a las fuerzas volumétricas son frecuentemente agrupados como "termino fuente", mientras que las contribuciones debido a las fuerzas de superficiales son considerados separadamente.

De acuerdo con (Anderson & Wendt, 1995), el esfuerzo del elemento fluido puede ser definido en términos de presión y nueve componentes de esfuerzos viscosos (normal y tangencial) que actúan en el elemento fluido.

Figura 2.1: Componentes de esfuerzo viscoso que actúan en un volumen de control.



*Fuente: (Versteeg, 1995)*

Las componentes del esfuerzo viscoso  $\tau_{ij}$  dependen del gradiente de velocidad (por ejemplo  $\frac{\partial u}{\partial x}$ ). De acuerdo con (Anderson & Wendt, 1995), el esfuerzo viscoso normal (tal como:  $\tau_{xx}$ ) es mucho más pequeño que el esfuerzo viscoso tangencial, por lo tanto estos esfuerzos son insignificantes en el análisis del flujo viscoso.

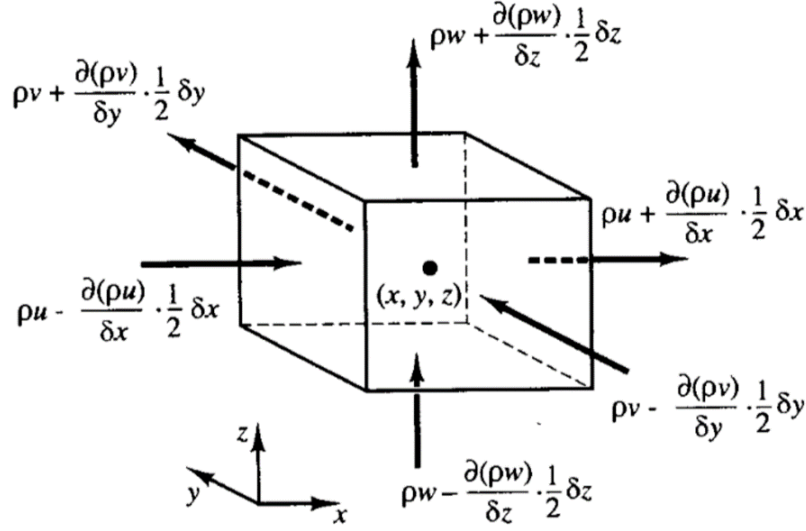
## 2.4. Ecuaciones diferenciales de flujo de fluidos

### 2.4.1. Ecuación de conservación de masa

La ecuación de conservación de masa deriva del principio de conservación de masa. La tasa de incremento de masa en un elemento fluido es igual a la tasa neta de flujo de masa en el elemento de fluido.

Si consideramos un elemento fluido infinitesimal de lados  $dx, dy$  y  $dz$  fijo en el espacio como se muestra en la Figura (2.2).

Figura 2.2: Entrada y salida de masa de flujo en un volumen de control.



**Fuente:** (Versteeg, 1995)

La tasa de incremento de masa en el elemento fluido por unidad de volumen es  $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ . La tasa neta de flujo de masa por unidad de volumen a través de sus caras puede ser expresado como:  $\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z}$ , donde:  $u, v$ , y  $w$  es la velocidad a lo largo de la dirección  $x, y, z$  respectivamente.

En un fluido compresible, la ecuación de conservación de masa no estacionario puede ser escrito como: (Anderson & Wendt, 1995).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.4)$$

Para un fluido incompresible, de densidad constante  $\rho$ ,  $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$  la ecuación (2.4) puede ser reescrito como:

$$\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} = 0 \quad (2.5)$$

#### 2.4.2. Ecuación de conservación de momentum

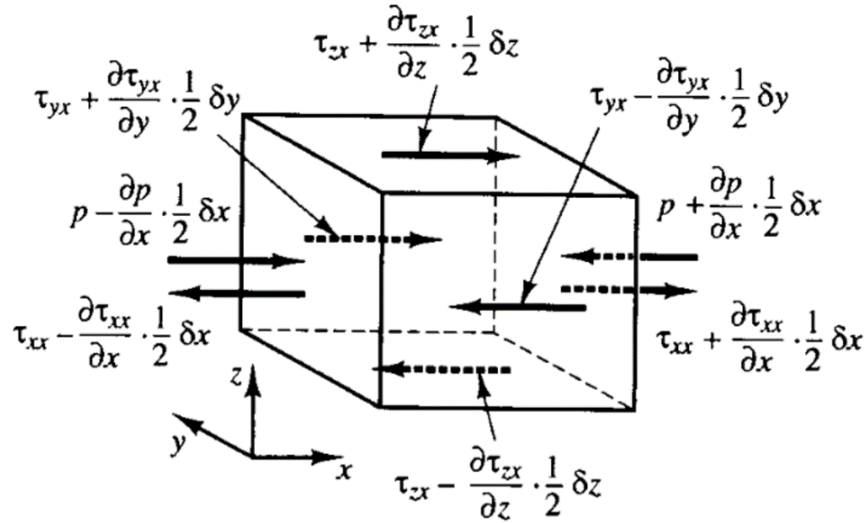
La ecuación de momentum se basa en el principio de conservación de momentum lineal, o en la segunda ley de Newton. "La tasa de incremento de momentum en el volumen de control es igual a la suma de fuerzas que actúan en la partícula fluida".

Usando el concepto de la derivada material, la tasa de incremento en las direcciones x,y, e z por unidad de volumen de una partícula fluida de densidad constante está dado por:  $\rho \frac{Du}{Dt}$ ,  $\rho \frac{Dv}{Dt}$  y  $\rho \frac{Dw}{Dt}$  respectivamente.

En la Figura (2.3) se ilustra solo el componente de las fuerzas superficiales (usando la serie de Taylor sin tomar en cuenta los términos de orden superior) debido a la presión p y al esfuerzo cortante  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{yx}$  y  $\tau_{zx}$ .

Un diagrama similar puede ser construido para las componentes y e z de las fuerzas superficiales.

Figura 2.3: Fuerzas superficiales que actúan en una partícula de fluido.



Fuente: (Versteeg, 1995)

La fuerza volumétrica se describe mediante el vector  $S_M$  agrupando el termino fuente de una partícula fluida por unidad de volumen y el tiempo.  $S_{Mx}$ ,  $S_{My}$  y  $S_{Mz}$  son las componentes de  $S_M$  en las direcciones x,y e z respectivamente.

La resultante de las fuerzas superficiales en la dirección x por unidad de volumen de una partícula fluida puede ser escrito como (Versteeg, 1995):

$$\frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

El efecto general de las fuerzas volumétricas en la dirección x de la ecuación de momentum

se puede incluir en la ecuación (2.7) agregando el termino fuente  $S_{Mx}$ .

El componente x de la ecuación de momentum establece que la tasa de cambio en la dirección x de la partícula fluida es igual a la fuerza total en la dirección x del elemento debido a las fuerzas superficiales más la tasa de aumento en la dirección x debido al término fuente Versteeg (1995).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial t} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2.7)$$

Similarmente en la dirección y e z la ecuación de momento puede ser derivado como:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (2.8)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (2.9)$$

El signo asociado con la presión (p) es opuesto al esfuerzo viscoso normal porque la convención de signos asume que el esfuerzo normal es positivo. Si la gravedad es la única fuerza volumétrica,  $S_{Mx} = 0$  y  $S_{My} = 0$ , mientras que  $S_{Mz} = \rho g$  donde g es el vector gravedad para un sistema de coordenadas con eje z concidiendo con la dirección vertical.

La ecuación de momento contiene incógnitas de esfuerzo viscoso  $\tau_{ji}$ , para la simplificación, del cálculo del esfuerzo es usualmente basado en un fluido newtoniano, donde el esfuerzo viscoso es proporcional a la tasa de deformación. Otros supuestos son la incompresibilidad e isotropía de un fluido newtoniano, (Schlichting *et al.*, 1955) muestran que la tasa lineal de deformación de un elemento de fluido tiene nueve componentes en tres dimensiones, seis de los cuales son independientes.

La ecuación de Stokes expresa los esfuerzos viscosos en términos de tasa de deformación y proporcionalmente constante. Los nueve componentes de esfuerzo viscoso para flujo incompresible puede ser expresado en términos de la viscosidad dinámica  $\mu$  y la tasa de deformación (Versteeg, 1995).

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.10)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2.11)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (2.12)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (2.13)$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ecuación de momentum se tiene una ecuación genérica del flujo de fluido que puede ser escrito usando la notación de Newton (White, 1991) y una forma general (Versteeg, 1995):

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial u_j} + \frac{\partial u_j}{\partial u_i} \right) \right] + S_M \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \text{div}(uv) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \text{divgrad}(u) + S_{Mx} \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \text{div}(vu) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \text{divgrad}(v) + S_{My} \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(wu) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \text{divgrad}(w) + S_{Mz} \quad (2.17)$$

Las ecuaciones anteriores son conocidas como la ecuación de Navier - Stokes para un fluido incompresible y flujo newtoniano en tres dimensiones (i=1,2,3. j=1,2,3).

### 2.4.3. Ecuación de transporte

Se puede notar que hay similitudes significativas entre las diversas ecuaciones derivadas del principio fundamental del flujo de fluidos, por ejemplo: conservación de masa, momentum y la energía. Si  $\phi$  es una variable general, la forma conservativa de toda la ecuación del flujo de fluido, incluye ecuaciones para cantidades escalares tales como la temperatura y la concentración de contaminantes, etc, se pueden escribir en forma siguiente (Versteeg, 1995):

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \text{div}(\rho \phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S_\phi \quad (2.18)$$

Dónde  $\Gamma$  es el coeficiente de difusión; en otras palabras, la ecuación (2.18) establece que la suma de tasa de incremento de  $\phi$  del elemento fluido más la tasa neta de flujo de  $\phi$  a la salida de un elemento fluido es igual a la suma de la tasa de incremento de  $\phi$  debido a la difusión más la tasa de incremento de  $\phi$  debido al termino fuente.

La ecuación (2.18) también conocido como la ecuación de transporte (advección-difusión) para alguna propiedad  $\phi$ . Destaca claramente los diversos procesos de transporte; la tasa de cambio y el término advectivo, respectivamente, en el lado izquierdo y el término difusivo y el término fuente, respectivamente, en el lado derecho.

En la solución de dinámica de fluidos computacional (CFD), el termino convectivo es casi siempre de naturaleza hiperbólica, el cual es un problema sin disipación significativa. Por otro lado, el termino difusivo es de naturaleza parabólica el cual es un problema con una disipación significativa (Anderson & Wendt, 1995).

#### 2.4.4. Métodos de solución numérica de las ecuaciones del flujo turbulento

##### 2.4.4.1. Simulación numérica directa (DNS)

Este método (cuyas iniciales provienen de la denominación inglesa Direct Numerical Simulation) consiste, en realidad, en no utilizar ningún modelo para la turbulencia, sino realizar discretización temporal y espacial que sean capaces de simular el flujo en un determinado problema. La resolución directa de las ecuaciones de Navier-Stokes resulta hoy en día abordable solo para un número muy limitado de problemas simples de interés académico. Los grandes centros dedicados a la mecánica de fluidos disponen de líneas de investigación con esta orientación, pero tanto las limitaciones en memoria de almacenamiento de las variables, como el tiempo de cálculo hacen de momento impensable la solución generalizada de problemas prácticos usando este tipo de técnica. Según Vandromme (1989), la primera solución de este tipo se realizó en 1981 en la Universidad de Stanford.

##### 2.4.4.2. Simulación de grandes remolino (LES)

Este tipo de técnica numérica reducen la complejidad de las ecuaciones que gobiernan considerando sólo parte de los efectos de flujo turbulento. Se estudia el intercambio energético entre las denominadas “fluctuaciones de gran escala” y se simula el efecto de las pequeñas escalas de la turbulencia. Se trata de un tipo de modelo intermedio entre la simulación directa y el promedio temporal de las ecuaciones de Navier-Stokes, que extiende el promedio tempo-



ral a la captura de ciertos efectos turbulentos básicos de forma numérica. En los modelos de simulación de grandes remolinos, las ecuaciones no estacionarias del flujo se resuelven para el flujo medio y para los grandes vórtices se modela el efecto de los pequeños vórtices. Aunque sin llegar al extremo de la simulación directa, sólo es posible para problemas simplificados y requiere capacidades de cálculo muy elevadas.

#### 2.4.4.3. Metodología (RANS)

Los metodología promediada de las ecuaciones de Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes), llamado también ecuaciones de Reynolds, ha sido muy estudiada y resulta bastante útil en la mayoría de los problemas prácticos. El procedimiento de promediar las leyes que describen el movimiento de una partícula se introduce en las ecuaciones con el fin de obtener el comportamiento promedio y la fluctuación de las distintas variables. Es decir se trata de obtener una descomposición de las variables en su valor medio y su valor fluctuante. Por ejemplo, para la velocidad, la descomposición sería:

$$\vec{V} = \overline{\vec{V}} + \vec{V}' \quad (2.19)$$

dónde la componente promedio de la velocidad se obtiene haciendo la integral de la velocidad instantánea  $\vec{V}$ :

$$\overline{\vec{V}}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{V}(t) dt \quad (2.20)$$

suponiéndose que el periodo de integración (T) es lo suficientemente grande en comparación con la escala temporal de la turbulencia, pero lo suficientemente pequeño como para no captar cualquier fenómeno no estacionario distinto a la turbulencia.

La metodología RANS es bastante adecuado, pues la mayoría de los fenómenos no estacionarios en mecánica de fluidos tiene lugar a frecuencias con rangos muy alejados de la turbulencia.

El promedio temporal de las ecuaciones de Navier Stokes, da lugar a unos términos, denominados las tensiones de Reynolds (Reynolds stress), que involucra el producto de los términos de fluctuación de la velocidad, cuya relación con las componentes promedios de flujo es desconocida. Para obtener dicha relación es necesario introducir un modelo adicional, denominado

modelo de turbulencia o ecuaciones de cierre.

Las distintas posibilidades prácticas en cuanto a modelos de turbulencia son analizadas a continuación. Habitualmente lo que interesa son los efectos de la turbulencia sobre valores promedios de las variables: la velocidad promedio y la presión promedio en el caso del flujo en un ducto.

Las ecuaciones de Reynolds considera la influencia de la fluctuación turbulenta en el flujo medio con  $\vec{V}$  (Con U,V y W son las componentes a lo largo de la dirección x, y e z).

En esta notación el vector fluctuación de velocidad es  $\vec{V}'$ , con componente  $u',v',w'$  en las direcciones de los ejes x,y e z, respectivamente.

En el sistema de coordenadas cartesiana, la ecuación de continuidad para flujo medio es ( $div \vec{V} = 0$ ) y las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo incompresible con viscosidad constante son:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + div(UU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu div grad U + \left[ -\frac{\overline{\partial u'^2}}{\partial x} - \frac{\overline{\partial u'v'}}{\partial y} - \frac{\overline{\partial u'w'}}{\partial z} \right] \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + div(VU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu div grad V + \left[ \frac{\overline{\partial u'v'}}{\partial x} - \frac{\overline{\partial v'^2}}{\partial y} - \frac{\overline{\partial v'w'}}{\partial z} \right] \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + div(WU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu div grad W + \left[ \frac{\overline{\partial u'w'}}{\partial x} - \frac{\overline{\partial v'w'}}{\partial y} - \frac{\overline{\partial w'^2}}{\partial z} \right] \quad (2.23)$$

Las ecuaciones (2.21), (2.22) y (2.23) muestra que se tienen más incógnitas (10) que el número de ecuaciones (4), situación conocida como el problema de cerradura. Para superar esta situación la metodología RANS requiere el modelamiento de turbulencia o introducción de modelos de turbulencia, para representar los términos de esfuerzo de Reynolds representados por:

$$\tau_{xx} = -\rho \overline{u'^2} \quad \tau_{yy} = -\rho \overline{v'^2} \quad \tau_{zz} = -\rho \overline{w'^2} \quad (2.24)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\rho \overline{u'v'} \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} = -\rho \overline{u'w'} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = -\rho \overline{v'w'} \quad (2.25)$$

Existen diferentes modelos de turbulencia, los modelos k- $\omega$  y k-*epsilon* son los más conocidos.

### ■ Modelo de turbulencia $k-\epsilon$ estándar

Las dos ecuaciones obtenidas (uno para  $k$  y otro para (*epsilon*) no pueden ser resueltas económicamente debido a su naturaleza de no cierre. Muchos investigadores como (Launder & Spalding, 1983) han simplificado aún más las ecuaciones que gobiernan  $k - \epsilon$  para producir técnicas de solución simple. Hrenya *et al.* (1998), (Iyer & Yavuzkurt, 1999), informan estudios comparativos de este modelo de turbulencia  $\kappa - \epsilon$ .

Entre estos modelos, el modelo estándar propuesto por (Launder & Spalding, 1983) es popular por su robustez (Versteeg, 1995). El sistema open TELEMAC MASCARET adopta el modelo original presentado por (Iyer & Yavuzkurt, 1999). De acuerdo a TELEMAC-2D 2001, el modelo  $\kappa - \epsilon$  puede ser expresado como:

$$k = \frac{1}{h} \int_{zf}^z \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_j} \cdot dz \quad \text{donde} \quad (i = 1 \text{ a } 3) \quad (2.26)$$

El cierre se hace por la hipótesis de Boussinesq (Versteeg, 1995) que expresa el tensor de Reynolds como una función de gradiente de velocidad media.

$$R_{ij} = -\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \kappa \delta_{ij} = 2\nu_t E_n - \frac{2}{3} \kappa \delta_{ij} \quad (2.27)$$

Donde  $i=1$  a  $2$  y  $j=1$  a  $2$ . El último término de la ecuación (2.27) contiene  $k$  que es insignificante (TELEMAC-2D, 2001). Este término es una parte de la integral de la presión en la ecuación de Navier Stokes que no se considera en TELEMAC por simplicidad. De acuerdo a Kolmogorov (Pope, 2001), la viscosidad turbulenta es calculada como:

$$\nu_t = C_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \quad (2.28)$$

En el software open TELEMAC MASCARET, la adaptación del modelo estándar  $\kappa - \epsilon$  es una extensión del modelo clásico presentado por (Rastogi & Rodi, 1978). Cabe señalar que la integración vertical da como resultado un término de disipación debido a la falta de uniformidad del perfil de velocidad, que no existe en el modelo clásico. El sistema open TELEMAC MASCARET resuelve las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + u \text{grad}(\kappa) = \frac{1}{h} \text{div} \left( h \frac{\nu_t}{\sigma_k \text{grad} \kappa} \right) + P - \epsilon + P_{kv} \quad (2.29)$$

El primer término en el lado derecho es el término de difusión. Mientras que los términos de producción se componen, por el gradiente de velocidad media horizontal y por otro lado el término del esfuerzo vertical (TELEMAC-2D. 2001).

$$P = \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad \text{donde} \quad i = 1 \quad a \quad 2 \quad y \quad j = 1 \quad a \quad 2 \quad (2.30)$$

$$P_{kv} = c_k \frac{u_*^3}{h} \quad \text{donde} \quad c_k = \frac{1}{\sqrt{c_f}} \quad (2.31)$$

$$P_{\varepsilon v} = c_\varepsilon \frac{u_*^4}{h^2} \quad \text{donde} \quad c_\varepsilon = 3,6 \frac{C_{2\varepsilon} \sqrt{C_\mu}}{c_f^{3,4}} \quad (2.32)$$

Dónde:  $c_f$  es el coeficiente de fricción,  $u_*$  es la velocidad de corte en el lecho, el cual es definido usando el esfuerzo cortante y el coeficiente de fricción  $c_f$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2.33)$$

El coeficiente de fricción  $c_f$  es calculado usando el coeficiente de Chezy  $C_h$   $c_f = \frac{2g}{C_h^2}$ . Ese valor también puede ser calculado usando el coeficiente de Strickler, Manning o Nikuradse. El valor de  $c_k$  y  $c_\varepsilon$  son determinados desde el flujo normal en el centro del canal principal (TELEMAC-2D, 2001). Todas las constantes adimensionales  $c_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, c_{1\varepsilon}, c_{2\varepsilon}$  son basados en casos de test clásicos. Un test prueba sobre la disminución libre de la turbulencia permite encontrar un valor de  $c_{2\varepsilon}$  (TELEMAC-2D 2001). La constante  $c_\mu$  y  $c_{1\varepsilon}$  son obtenidos desde la data para un flujo turbulento cerca de la pared sólida. La constante  $\sigma_k$  y  $\sigma_\varepsilon$  han sido (optimizados) en base al rendimiento de los casos de prueba.

## 2.5. Transporte de sedimentos

### 2.5.1. Características físicas del sedimento

Las características físicas del sedimento tienen un papel importante en la determinación del movimiento de las partículas, es decir, el movimiento incipiente. Las partículas de sedimento se pueden caracterizar de acuerdo a su tamaño, forma, uniformidad, velocidad de asentamiento, cohesión y ángulo de reposo.

Las dimensiones de las partículas de sedimento cubren un gran rango, que a su vez es usado

para clasificar a los sedimentos (Yang & Song, 1979). El tamaño del sedimento es comúnmente determinado por análisis granulométrico. Lo más común para la clasificación del sedimento es de la Unión Geofísica Americana, que se basa en el diámetro aproximado de las partículas de sedimento (Armitage & McGahey, 2003). Una amplia variedad de "formas" de partículas de sedimentos se observan en los ríos. Van Rijn *et al.* (1993) presentó el llamado "factor de forma" para tener en cuenta la desviación esférica. Naturalmente el cuarzo, partícula que tiene típicamente el factor forma de 0.7.

La distribución del tamaño del sedimento es determinada por el análisis granulométrico para determinar el tamaño del sedimento.

La uniformidad del sedimento, se determina a partir de la frecuencia de histogramas que representa el porcentaje de material que pasa por un diámetro de tamiz, pero retenido en otro tamiz de menor tamaño. Parámetros estadísticos tales como la media, desviación estándar, asimetría y curtosis pueden determinarse a partir de esto (Van Rijn *et al.*, 1993).

El diámetro medio  $d_{50}$  es el diámetro que no excede en un 50 por ciento del material por masa y se expresa así:

$$d_{50} = \frac{d_{15,9} + d_{84,4}}{2} \quad (2.34)$$

El diámetro medio ( $\bar{d}$ ) es la media aritmética del tamaño de la partícula y se puede expresar en términos de la mediana del diámetro medio  $d_i$  de cualquier fracción de tamaño de partícula y el porcentaje de masa de esa fracción  $p_i$  de la siguiente manera:

$$\bar{d} = \frac{\sum p_i d_i}{100} \quad (2.35)$$

La desviación estándar  $\sigma$  es determinada usando el diámetro medio ecuación (2.36). La desviación estándar geométrica  $\sigma_g$  es calculado usando la ecuación (2.37), el cual asume la distribución normal de las partículas, lo que es aproximadamente cierto para una clasificación fina o arena uniforme. Si  $\sigma_g < 1.3$ , el sedimento es considerado uniforme, si  $\sigma_g > 1.3$ , el sedimento es considerado no uniforme, (Melville & Raudkivi, 1996).

$$\sigma^2 = \frac{\sum p_i (d_i - \bar{d})^2}{100} \quad (2.36)$$

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84,4}}{d_{15,9}}} \cong \frac{1}{2} \left( \frac{d_{50}}{d_{15,9}} + \frac{d_{84,4}}{d_{16}} \right) \quad (2.37)$$

La velocidad de asentamiento de la partícula de sedimento es a veces llamada velocidad de caída que generalmente es definido como la velocidad terminal de la partícula en un cuerpo de agua, en general depende: del tamaño, forma, rugosidad superficial y densidad de la partícula de sedimento; también de la densidad y la viscosidad del fluido. Además del régimen del fluido tiene influencia en la velocidad de asentamiento.

Si la partícula es menos densa que el fluido, puede tener velocidad de asentamiento negativo algunas veces llamado velocidad de subida (Raudkivi & Sutherland, 1981); se calcula la velocidad de asentamiento  $v_{ss}$  usando el coeficiente de arrastre  $C_D$ .

De acuerdo a Van Rijn *et al.* (1993) la velocidad de asentamiento de las partículas no esféricas con: diámetro característico  $d$ , gravedad específica  $s$ , viscosidad cinemática  $\nu$  y la aceleración de la gravedad  $g$ , pueden ser estimados de la siguiente forma:

$$v_{ss} = \frac{(s-1)gd^2}{18\nu} \quad 1 < d \leq 100 \quad \mu m \quad (2.38)$$

$$v_{ss} = \frac{10\nu}{d} \left[ \sqrt{1 + \frac{0,01(s-1)gd^3}{18\nu^2}} - 1 \right] \quad 100 < d \leq 1000 \quad \mu m \quad (2.39)$$

$$v_{ss} = 1,1[(s-1)gd]^{0,5} \quad d > 1000\mu m \quad (2.40)$$

Cheng (1997), aproximadamente la velocidad de asentamiento  $v_{ss}$  de la partícula de arena teniendo en cuenta la densidad relativa sumergida  $\Delta$  y el diámetro adimensional de la partícula  $d_*$  es:

$$v_{ss} = \nu \left( \frac{(\sqrt{25 + 1,2d_*^2} - 5)^{(1,5)}}{d} \right) \quad (2.41)$$

$$d_* = \left( \frac{\Delta g}{\nu^2} \right)^{(1/3)} d_{50} \quad (2.42)$$

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (2.43)$$

Generalmente la velocidad de caída es significativamente pequeña en altas concentraciones. El efecto de la concentración en la velocidad de asentamiento es conocido como: asentamiento obstaculizado, (Raudkivi & Sutherland, 1981). El sedimento puede ser dividido principalmente en dos grupos; cohesivo (limo, arcilla) y no-cohesivo (arena).

El peso de las partículas es la fuerza determinante en la transportabilidad de sedimentos

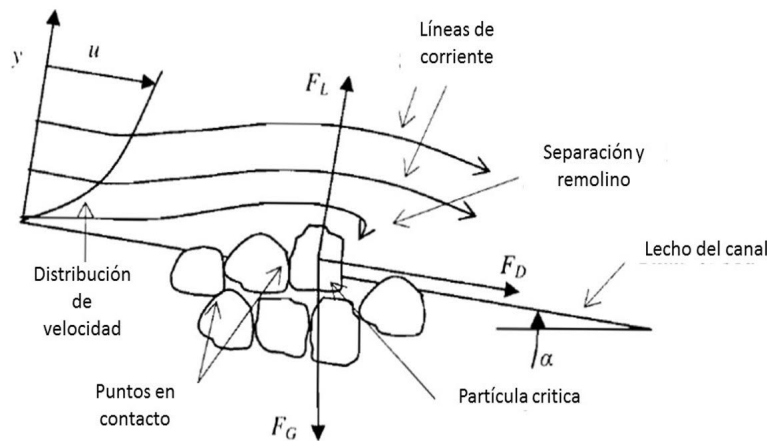
no-cohesivos. Por otro lado, para sedimentos cohesivos, la fuerza fisicoquímica juega un rol importante. Las propiedades del suelo permite que la partícula de sedimento se comporte como una gran masa. Vanoni & Nomicos (1959) describen que una vez suspendido la masa cohesiva se rompe y las partículas se comportan como materiales no cohesivos.

El ángulo de reposo  $\phi_r$ , algunas veces llamado el ángulo interno de fricción, es la máxima pendiente lateral que puede ser sostenido la partícula de sedimento que se encuentran en el fondo o en los lados del canal antes de que comience el deslizamiento. (Van Rijn *et al.*, 1993); sin embargo,  $\phi_r$  para cualquier material que no sea arena cuarcita debe determinarse experimentalmente.

### 2.5.2. Fuerzas que actúan en la partícula de sedimento

En realidad, una partícula de sedimento en el lecho del canal está rodeada de partículas vecinas que descansa sobre el lecho antes del movimiento incipiente. Tres fuerzas principales actúan sobre la partícula expuesta: (fuerza de arrastre, suspensión y gravedad). La Figura (2.4) muestra las diferentes fuerzas que actúan sobre una partícula de sedimento (lecho inclinado).

Figura 2.4: Fuerzas en la partícula de sedimento con lecho inclinado.



La fuerza de arrastre  $F_D$ , la fuerza de sustentación  $F_L$  y la fuerza de presión y al esfuerzo cortante que actúan sobre la partícula.

El esfuerzo cortante en cualquier punto de la superficie de la partícula actúa tangencialmente

en la dirección del flujo y depende de la gradiente de velocidad local. La fuerza de arrastre debido al esfuerzo cortante a menudo se denomina resistencia superficial.

$$\tau_{xy} = (\mu + \mu_{xy(t)})\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \quad (2.44)$$

En la ecuación (2.44)  $\mu$  es el coeficiente de viscosidad debido a que el esfuerzo cortante actúa en el flujo y  $\mu_{xy(t)}$  se debe al flujo turbulento. La fuerza de presión en cualquier punto de la superficie de la partícula que actúa normal a su superficie depende de la profundidad y la velocidad local de acuerdo con la ecuación de Bernoulli. Si  $z$  es la altura sobre alguna referencia, la ecuación de Bernoulli puede ser escrito como en la ecuación (2.44). La presión en la profundidad del agua  $p = \rho g y$  se puede determinar usando las condiciones hidrostáticas.

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{u_u^2}{2g} + z = \text{constante} \quad (2.45)$$

La ecuación (2.45) indica claramente que para una referencia constante, el aumento en la velocidad conducen a una disminución correspondiente en la presión local. Esta situación se complica por la separación de flujo, que resulta en la formación de remolinos, Según Armitage & McGahey (2003), los remolinos redistribuyen la presión de manera más uniforme sobre las superficies separadas. Van Rijn *et al.* (1993) muestran que la integración de las fuerzas de presión sobre toda la superficie de la partícula indica la fuerza de arrastre resultante, que se conoce como: arrastre de forma.

La fuerza gravitacional  $F_G$  está relacionada con el peso sumergido de la partícula. A pesar de la ausencia del movimiento del fluido, hay una fuerza neta en la partícula y su dirección depende del efecto de flotabilidad. La fuerza gravitacional actúa verticalmente hacia abajo si la partícula es más densa que el agua y verticalmente hacia arriba si no lo es. Van Rijn *et al.* (1993) describen la fuerza gravitatoria  $F_G$  de una partícula crítica en función de un diámetro de partícula  $d$ , densidad de partícula  $\rho_s$  y densidad de agua  $\rho$ :

$$F_G = \frac{1}{6}\pi(\rho_s - \rho)gd^3 \quad (2.46)$$

Chien & Wan (1999) describen la fuerza de arrastre  $F_D$  y la fuerza de sustentación  $F_L$  usando el área proyectada  $a_p$  (que se define diferente para la fuerza de arrastre y la fuerza de sustentación), coeficiente de arrastre  $C_D$ , coeficiente de sustentación  $C_L$ , densidad del agua



y velocidad efectiva cerca de la partícula del lecho  $u_0$  como:

$$F_D = C_D a_p \frac{\rho u_0^2}{2} \quad (2.47)$$

$$F_L = C_L a_p \frac{\rho u_0^2}{2} \quad (2.48)$$

La presencia de una frontera en el canal hace que la distribución de la velocidad no sea lineal. También la fuerza de sustentación es relativamente mayor en la frontera donde las fuerzas de arrastre no actúan en el centro de la gravedad de la partícula, según Saffman (1965), para un flujo viscoso, la fuerza de sustentación debido al movimiento de giro es menor que el efecto de corte y es generalmente despreciado Colebrook & White (1937).

### 2.5.3. Papel de la rugosidad efectiva

La rugosidad efectiva  $k$  es muy importante para la simulación. En el caso de un lecho móvil, es la suma de la rugosidad del grano ( $k_{sg}$ ) generada por la fricción superficial y la rugosidad de forma ( $k_{sf}$ ) generada por la fuerza de presión que actúan sobre el lecho.

$$k_s = k_{sg} + k_{sf} \quad (2.49)$$

Según Van Rijn *et al.* (1993), se pueden usar dos enfoques para estimar la rugosidad del lecho; parámetros relacionados con la forma (por ejemplo, longitud de la forma del lecho, altura, inclinación y material del lecho) o parámetros integrales (por ejemplo, profundidad media, velocidad media).

Según Young *et al.* (2010), la partícula en la frontera podría formar parte de una frontera laminar ( $Re_s < 5$ ), frontera de transición ( $5 < Re_s < 70$ ) o frontera turbulenta ( $Re_s > 70$ ), donde  $Re_s$ , es el número de Reynolds de la rugosidad.

$$Re_s = \frac{u_* k_s}{\nu} \quad (2.50)$$

Dónde:  $\nu$  es la viscosidad cinemática y  $u_*$  es la velocidad de corte que se define utilizando el esfuerzo cortante del lecho  $\tau_0$  y la densidad del fluido  $\rho$ :

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2.51)$$

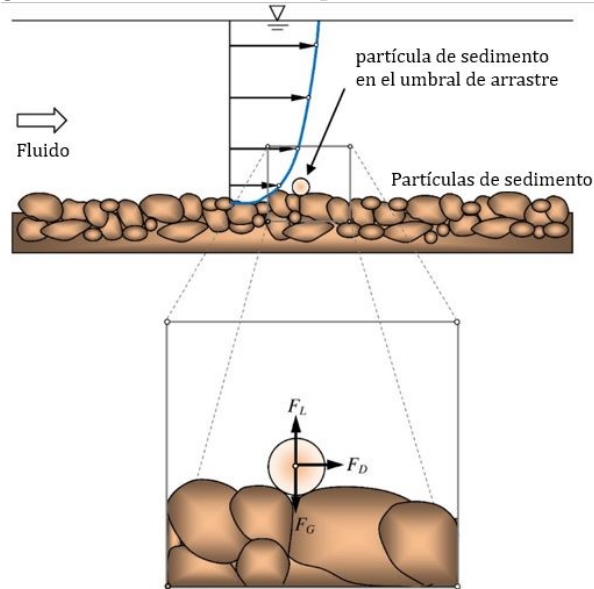
Colebrook & White (1937) muestran cuando  $Re_s$ , aumenta más allá de 3.5, comienza la separación detrás de la parte superior de la partícula y se forma una estela. De acuerdo con Chien & Wan (1999), la fuerza de arrastre se convierte entonces en la fuerza dominante. Otras definiciones de  $k_s$ , son Yang & Song (1979),  $k_s = d_{65}$ ; (Einstein *et al.*, 1950),  $k_s = d_{90}$  Meyer-Peter & Müller (1948)  $k_s = d_{85}$ ; Simons & Richardson (1966). El valor de  $k$  disminuye significativamente al aumentar la velocidad, probablemente porque las formas del lecho se vuelven más redondos o se lavan (Van Rijn *et al.*, 1993).

#### 2.5.4. Inicio del movimiento del sedimento

El inicio del movimiento del sedimento se puede determinar a partir de las fuerzas que actúan sobre las partículas debido a las fuerzas de arrastre, sustentación y la gravedad.

Van Rijn *et al.* (1993) describen el inicio del movimiento de sedimento utilizando las fuerzas que actúan sobre la partícula de sedimento en el lecho como se muestra en la Figura (2.5)

Figura 2.5: Fuerzas en la partícula de sedimento



Fuente: Van Rijn *et al.* (1993)

Van Rijn *et al.* (1993) descuidan la relación de la fuerza de sustentación y el peso de la partícula sumergida  $F_L/F_G = 0$ . Introduce el coeficiente empírico  $\alpha_1$ , que tiene en cuenta el efecto de la sustentación. La condición de movimiento del sedimento, esta dado por:

$$F_D \geq \alpha_1 F_G \tan \varphi \quad \alpha_1 = \frac{b_2}{b_1 + b_2} \quad (2.52)$$

El valor del coeficiente empírico  $\alpha_1$  depende de la turbulencia local y, por lo tanto, del número de Reynolds Van Rijn *et al.* (1993).

Yang & Song (1979) agrega más simplificaciones y muestra el movimiento incipiente del sedimento que satisface una o más de las tres condiciones indicadas en la ecuación (2.53) y la Figura (2.6).

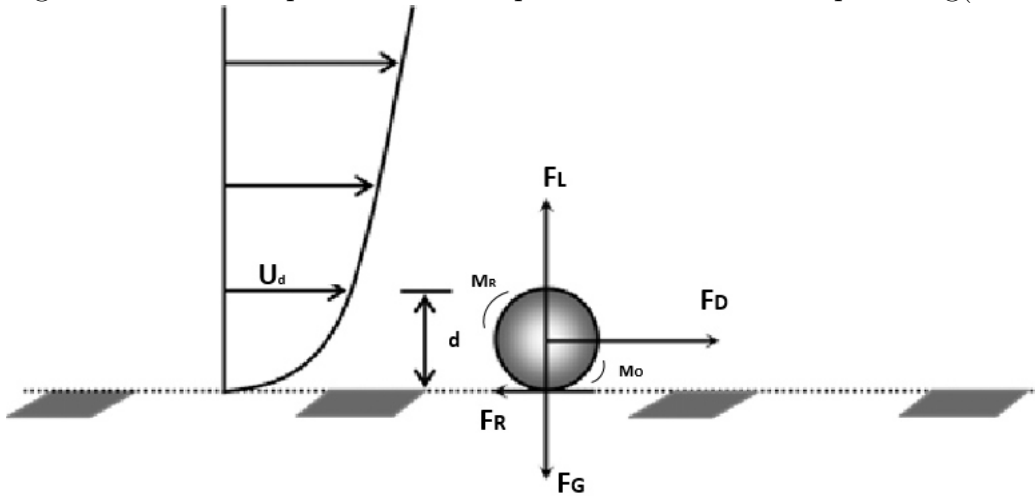
$$F_L = F_G \quad (2.53)$$

$$F_D = F_R \quad (2.54)$$

$$M_O = M_R \quad (2.55)$$

Dónde:  $F_L$  es la fuerza de sustentación,  $F_G$  es la fuerza de gravedad,  $F_D$  es la fuerza de arrastre,  $F_R$  es el fuerza de resistencia,  $M_O$  es el momento de vuelco debido a  $F_D, F_R$  y  $M_R$  es el momento de resistencia debido al  $F_L$  y  $F_G$ .

Figura 2.6: Fuerzas que actúan en la partícula de sedimento por Yang(1996)



Fuente: Yang & Song (1979)

En realidad, el cálculo de las fuerzas que actúan sobre una partícula es difícil. Muchos investigadores, definen los criterios de movimiento incipiente del sedimento usando esfuerzo cortante

Shield et al., (1936), velocidad (Yang & Song, 1979). Fuerza de la corriente (Bagnold, 1966) o probabilidad (Gessler, 1970).

Shields (1936) fue uno de los primeros investigadores en darse cuenta de la dificultad del cálculo y análisis de las fuerzas que actúan sobre una partícula de sedimento. Él utilizó el análisis dimensional para establecer su conocido diagrama de Shields para un movimiento incipiente de una partícula usando el parámetro adimensional, por ejemplo: número Reynolds de la partícula  $Re_*$ , y el parámetro de Shield  $\theta$ .

$$Re_* = \frac{u_* d}{\nu} \quad (2.56)$$

$$\theta = \frac{\tau_0}{(\rho_s - \rho)gd} = \frac{\rho u_*^2}{(\rho_s - \rho)gd} \quad (2.57)$$

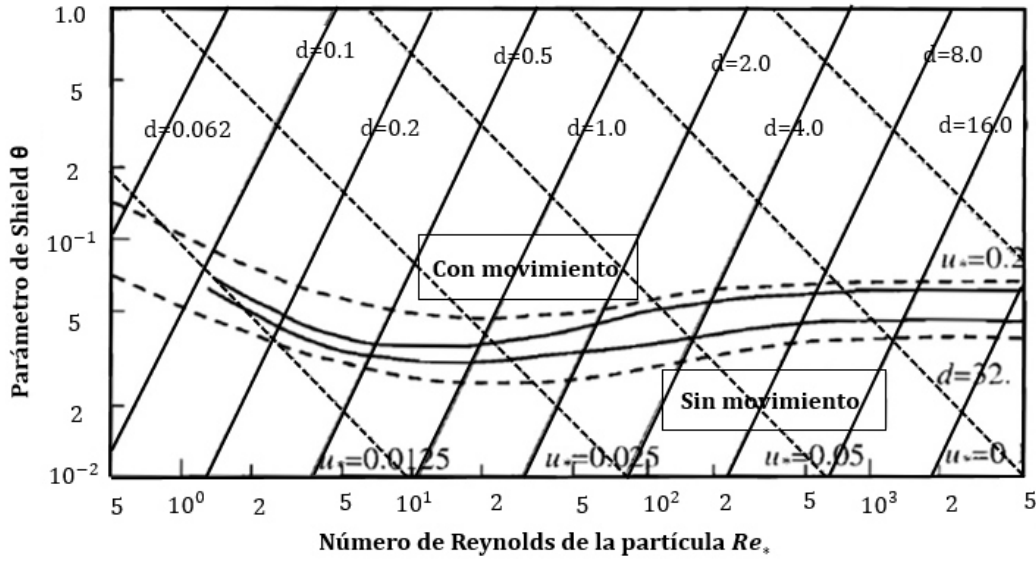
Dónde:  $u_*$  velocidad de corte,  $d$  diámetro de la partícula,  $\rho_s$  es la densidad del sedimento,  $\rho$  es la densidad del agua y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Shields (1936) midió la tasa de transporte en varios valores de  $\theta$  al menos dos veces más grande que el valor crítico  $\theta_c$ , y luego extrapoló linealmente al punto cero. Este método indirecto se utilizó para evitar la dificultad de determinar la condición de precisión en la que una partícula de sedimento debería moverse. Si  $\tau_c$  es el esfuerzo cortante crítico de cizallamiento del lecho para el movimiento incipiente, luego el parámetro crítico Shields  $\theta_c$ , está dado por:

$$\theta_c = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gd_{50}} \quad (2.58)$$

La Figura (2.7) muestra el parámetro Shields como una función del número de Reynolds de la partícula. La línea sólida indica la extensión de datos por Shields, (Raudkivi & Sutherland, 1981).

Figura 2.7: Parámetro de Shields con respecto al número de Reynolds de la partícula.



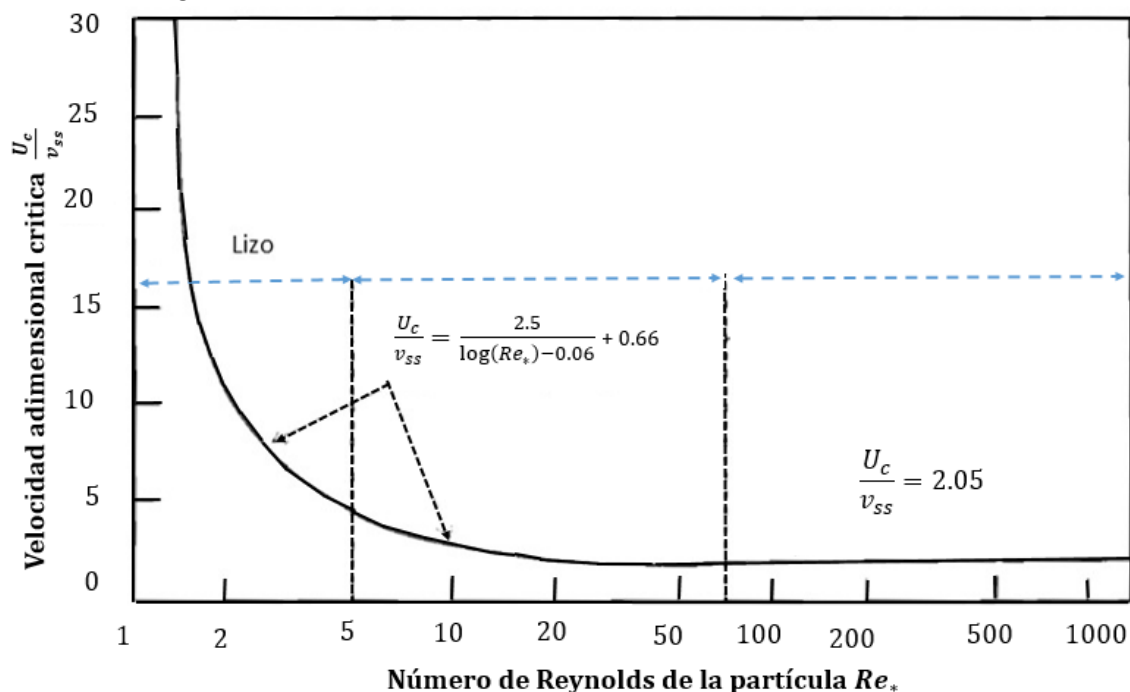
Fuente: Raudkivi &amp; Sutherland (1981)

Yang & Song (1979) propusieron una velocidad crítica adimensional  $Uc/\nu_{ss}$  para describir el movimiento incipiente del sedimento usando el número de Reynolds de la partícula  $Re_*$ . Mostró una variación en línea recta o parabólico de la velocidad crítica adimensional  $Uc/\nu_{ss}$  en régimen hidráulicamente liso ( $Re_* < 5$ ) y en régimen completamente rugoso ( $Re_* > 70$ ) y en régimen de transición ( $5 < Re_* < 70$ ), en ambos la contribución de la fricción laminar y la fricción turbulenta deben ser considerados.

En base a los datos de campo, Yang & Song (1979) sin embargo, extendió la curva parabólica para este régimen teniendo en cuenta los efectos de coeficientes empíricos con respecto a  $Re_*$ . La curva del movimiento incipiente Yang & Song (1979) se muestra en Figura (2.8).

Debe notarse que Yang & Song (1979) ignoró el efecto de la rugosidad del flujo ( $y/d$ ) para el régimen de transición debido a la falta de disponibilidad de datos. Talapatra & Ghosh (1983) independientemente verificaron los criterios de Yang & Song (1979).

Figura 2.8: Variación de las dimensiones de la velocidad crítica.



Fuente: Yang &amp; Song (1979)

### 2.5.5. Formas de transporte de sedimentos

Una vez que se ha iniciado el movimiento de las partículas de sedimento. La partícula comienza a moverse, en un canal aluvial. Se observan tres tipos diferentes de movimiento de partículas Van Rijn *et al.* (1993); deslizando, rodando, saltando.

En la mayoría de los casos, la partícula de sedimento rodará o se deslizará antes de que sean llevados a suspensión.

El transporte de partículas por laminación, deslizamiento y saltación en las proximidades del lecho se denomina colectivamente carga de fondo del lecho, que se refiere a los sedimentos que se mueven continuamente en contacto con la frontera, es decir, deslizando y rodando. La saltación es cuando las partículas saltan siguiendo trayectorias de tipo parabólico cerca del lecho.

Las partículas suspendidas son transportadas por las corrientes turbulentas y permanecen en suspensión durante un período apreciable. Según Yang (1996), los sedimentos se transportan principalmente a través de la carga suspendida en la mayoría de los ríos naturales mientras

que el transporte de fondo del lecho es solo alrededor del 5 % dependiendo de la clase del sedimento.

Según Raudkivi & Sutherland (1981), la concentración de sedimentos en suspensión (volumen sólido) disminuye con la distancia desde el lecho. Esta tasa de disminución depende de la velocidad de caída  $v_{ss}$  y de la velocidad de corte del lecho  $u_*$ . El cual se usa para definir el número de movilidad  $Mn = u_*/v_{ss}$ . Propone una regla empírica para la predicción de diferentes tipos de transporte que utiliza el número de movilidad, por ejemplo:

- Rodando y/o deslizándose  $6 > (1/Mn) > 2$ .
- Saltando  $2 > (1/Mn) > 0,6$ .
- Suspensión  $0,6 > (1/Mn) > 0$ .

Graf & Altinakar (1998) distinguen diferentes tipos de transporte de sedimentos en términos de mezcla agua-sedimento, dependiendo de la concentración de sedimento  $C_s$  (volumen sólido por unidad de volumen de agua) o concentración de sedimento  $\Delta\rho$  (masa sólida por unidad de volumen del agua), se divide en tres partes:

- La carga del lecho y el transporte de carga en suspensión son comunes en una mezcla newtoniana ( $C_s < 1\%$  o  $\Delta\rho < 16\text{kg}/\text{m}^3$ ) que se encuentra con mayor frecuencia en los cursos de agua.
- En una mezcla cuasi newtoniano ( $C < 8\%$  o  $\Delta\rho < 130\text{kg}/\text{m}^3$ ) usualmente se observa la concentración en suspensión cerca del lecho.
- Las corrientes de turbidez, por ejemplo, entran en esta categoría. Mezclas no newtonianas ( $C_s > 8\%$  o  $\Delta\rho > 130\text{kg}/\text{m}^3$ ) se asocian con las suspensiones hiper-concentradas experimentadas con corrientes de turbidez y flujo de escombros.

Clásicamente, la suma de la carga de fondo y carga suspendida se conoce colectivamente como carga total. Dependiendo de la fuente de material de sedimentos. Raudkivi & Sutherland (1981) descompone aún más la carga total en carga de material del lecho y carga de lavado. En general, la carga de lavado consiste en materiales que son más finos que los que se encuentran en el lecho del río y casi nunca están en contacto con el lecho. La cantidad de carga de lavado depende principalmente del suministro de la cuenca (hidrología), no de la hidráulica del río.

### 2.5.6. Fórmulas de transporte de sedimentos no cohesivo

Está asociado con el inicio del movimiento de sedimentos y continúa mediante el transporte de sedimentos debido a las fuerzas hidrodinámicas a menos que la condición de equilibrio se alcance. Se han desarrollado una gran cantidad de fórmulas semi-empíricas para calcular la tasa de transporte sólido como una función de variables hidrodinámicas (tirante, fricción de fondo, olas, etc.) y de las variables del sedimento como:  $d_{50}$ ,  $d_{90}$ , densidad relativa, etc. Raudkivi & Sutherland (1981).

La fórmula de transporte puede estimar solo la carga del lecho o carga suspendida o carga total. Las fórmulas se pueden agrupar de acuerdo a su enfoque teórico, por ejemplo: (el esfuerzo cortante, la energía de pendiente, probabilidad, potencia de las líneas de corriente etc). Las fórmulas utilizadas en este estudio se analizan a continuación.

#### 2.5.6.1. Meyer-Peter and Muller

La fórmula de Meyer-Peter y Muller (1948) se basa en el enfoque de la pendiente de energía y es limitado al transporte de "carga del lecho". Llevaron a cabo extensos trabajos experimentales en un canal de laboratorio con una sección transversal de  $2 \times 2 m^2$  y una longitud de 50m. El material del lecho que se uso fue una mezcla de partículas que tiene las siguientes características: ( $d = 0.4$  a  $29$  mm, pendiente,  $S$   $0.0004$  a  $0.02$ , profundidad  $0.1$  a  $1.2$  m). De acuerdo con Meyer-Peter & Müller (1948). El transporte de carga del lecho  $q_b$  puede expresarse como Van Rijn *et al.* (1993):

$$\Phi_b = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} = 8(\mu_b\theta - 0,047)^{(1,5)} \quad (2.59)$$

$$\mu_b = \left[ \frac{C_h}{C_h'} \right] = \left[ \frac{\log(12h/k_s)}{\log(12h/d_{90})} \right]^{(1,5)} \quad (2.60)$$

Donde:

- $\Phi_b$  es la función de carga de fondo adimensional del sedimento.
- $\theta$  es el parámetro Shields.
- $\mu_b$  es el factor de forma del lecho o el factor de eficiencia.



- $\bar{d}$  es el diámetro medio de la partícula.
- $C_h$  es el coeficiente de Chezy.
- $C'_h$  es el coeficiente de Chezy relacionado con el grano.
- $k_s$  es la aspereza efectiva del lecho y  $h$  es la profundidad de agua.

El valor constante 0.047 puede interpretarse como el parámetro de Shields crítico  $\theta_c$  porque en el experimento considera material grueso. Meyer-Peter y Muller (1948) encontraron el valor de  $\bar{d} = \Sigma p_i d_i$  puede ser cerca aproximadamente 1.1 a 1.3 veces más grande que  $d_{50}$  para material casi uniforme. El diámetro medio de la partícula  $d_{50}$  también puede usarse por ejemplo como  $\bar{d}$ , sin embargo la rugosidad del grano está relacionado con  $d_{90}$ . De acuerdo con Van Rijn *et al.* (1993). La fórmula muestra que una variación del 25 % del diámetro de la partícula ( $\bar{d} = 800 \pm 200 \mu m$ ) resulta un 10 % de variación de la tasa de transporte ( $q_b = 4,1 \times 10^{-5} \pm 0,4 \times 10^{-5} m^2/s$ ) para arena uniforme, el coeficiente de Chezy relacionado con el grano  $C'_h$  es a menudo aproximado en términos de  $d_{50}$  así que usando la relación  $d_{90} = 3d_{50}$  (SISYPHE 2004).

Cabe señalar que el valor de  $\Phi_h$  será cero si el valor de  $\mu_b \theta < \theta_c = (0,047)$ . SISYPHE (2004) recomienda el uso de la fórmula de Meyer-Peter y Muller para los sedimentos finos a gruesos en el rango  $0,4 < d_{50} < 29 mm$ .

#### 2.5.6.2. Einstein y Brown

Einstein *et al.* (1950) fue uno de los primeros investigadores en estimar el transporte de sedimentos utilizando el concepto de probabilidad. Las dificultades para definir el criterio crítico de movimiento incipiente y la necesidad de tener en cuenta las fluctuaciones de flujo turbulento en el transporte de sedimentos en lugar de las fuerzas que actúan sobre las partículas de sedimento. Como resultado expresó la probabilidad del comienzo y cese del movimiento del sedimento. En su experimento destacaron los siguientes puntos (Yang & Song, 1979):

- Hay un intercambio constante e intenso de partículas entre el material del lecho y carga del lecho.

- La tasa de erosión depende del número y las propiedades de las partículas en unidad de área y la probabilidad de la fuerza de sustentación hidrodinámica instantánea en la partícula sea grande, lo suficiente para moverlo. Por otro lado, la tasa de deposición por unidad de área del lecho unitario depende de la tasa de transporte más allá de una sección determinada. Como, ver la probabilidad de que la carga hidrodinámica permitirá que la partícula se deposite.

El enfoque de Einstein *et al.* (1950) se basa en la condición de lecho estable, es decir, la tasa de deposición debe ser igual a la tasa de erosión. En consecuencia, el número de partículas de tamaño  $d$  erosionado por unidad de tiempo y unidad de área del lecho se calcula utilizando la probabilidad de que cualquier partícula dada se erosione. Al mismo tiempo, la cantidad de partículas, que se depositarán por unidad de área y unidad de tiempo son calculados usando la relación de la descarga del lecho. Por lo tanto, correlaciona esta erosión y deposición teniendo en cuenta la fuerza de sustentación y el peso sumergido de las partículas para obtener el transporte de carga del lecho. De acuerdo con Yang & Song (1979). Einstein *et al.* (1950) usó tres diferentes figuras gráficas para calcular la carga del lecho.

Brown (1950) desarrolló aún más el enfoque de Einstein *et al.* (1950) teniendo en cuenta el parámetro de Shields  $\theta$  y la característica adimensional del diámetro de sedimento  $d_*$ , Yang & Song (1979).

Einstein *et al.* (1950) propusieron la siguiente ecuación para calcular la carga del lecho:

$$\Phi_b = \frac{q_b}{\sqrt{g(s-1)d_{50}^3}} = f_1(d_*)f_2(\theta) \quad (2.61)$$

$$f_1(d_*) = \left(\frac{2}{3} + \frac{36}{d_*}\right)^{0,5} - \left(\frac{36}{d_*}\right)^{0,5} \quad (2.62)$$

$$f_2(\theta) = 2,15 \exp(-0,391/\theta) \quad \theta \leq 0,2 \quad (2.63)$$

$$f_2(\theta) = 40\theta^3 \quad \theta > 0,2 \quad (2.64)$$

SISYPHE (2004) recomienda usar la fórmula de Einstein *et al.* (1950) para sedimentos relativamente gruesos en el rango  $0,2 < d_{50} < 3,0mm$

### 2.5.6.3. Engelund y Hansen

Bagnold (1966) fue uno de los primeros investigadores en desarrollar una función de transporte de sedimentos teniendo en cuenta el efecto de las líneas de corriente Engelund & Hansen (1967) luego aplicaron el enfoque de Bagnold y utilizaron el principio de similitud para obtener una función adimensional de carga total de transporte de sedimento total adimensional  $\Phi_t$ .

El concepto de balance de energía  $W_r = W_d$  también se considera teniendo en cuenta la altura de la forma del lecho y la longitud de la forma del lecho,  $W_r$  es el trabajo por unidad de tiempo y ancho requerido para elevar la carga de sedimentos sobre una altura igual a la altura del lecho.  $W_d$  es el trabajo por unidad de tiempo hecho por el fluido al mover las partículas sobre una longitud igual a la forma del lecho.

Engelund & Hansen (1967) utilizaron 100 conjuntos de datos con el parámetro crítico de Shields de 0.06 (partículas finas) para establecer la relación entre la tasa de transporte y el parámetro Shields  $\theta$ . La fórmula calcula la carga total  $q_t$ , puede expresar como Van Rijn *et al.* (1993):

$$q_t = \frac{0,05U^5}{(s-1)^2g^{0,5}d_{50}^3C_h^3} \quad (2.65)$$

Donde:  $U$  es la velocidad promediada en la profundidad,  $s$  es la densidad específica,  $C_h$  es el coeficiente Chezy,  $g$  es la aceleración de la gravedad, y  $d_{50}$  es el diámetro medio de la partícula de sedimento. La ecuación (2.66) es la fórmula original de transporte de sedimentos dada por Engelund & Hansen (1967).

Para lograr consistencia con las formulaciones del modelo y el cálculo de la fricción del fondo. SISYPHE (2004) simplifica la fórmula original de Engelund & Hansen (1967) en términos de la tasa de transporte no-dimensional  $\Phi_t$  como:

$$\Phi_t = \frac{q_t}{\sqrt{g(s-1)d_{50}^3}} = 0,05 \frac{\theta^{2,5}}{c_f} \quad (2.66)$$

Donde: el coeficiente de fricción  $c_f$  puede ser calculado usando varios coeficientes dados en SISYPHE(2004).

Para canales aluviales, (Chollet Cunge, 1980) modificaron aún más la fórmula de Engelund & Hansen (1967) para explicar los efectos de la formación de dunas utilizó la fricción superficial adimensional, basado en las pruebas de validez del modelo.

SISYPHE (2004) recomienda usar la fórmula de Engelund & Hansen (1967) para sedimentos finos en el rango  $0,2 < d_{50} < 1mm$ .

#### 2.5.6.4. Van Rijn

Van Rijn *et al.* (1993) llevaron a cabo 130 experimentos con diámetros de partículas,  $d_{50}$  por lo que van desde  $200$  a  $2000\mu m$ . Para profundidades de agua mayores a  $0.1$  y número de Froude menor a  $0.9$ . La influencia de la rugosidad de la pared lateral se eliminó utilizando el método de Vanoni & Nomicos (1959). Usaron un factor de forma del lecho para eliminar la rugosidad causada por la forma del lecho. Usando las características adimensionales del diámetro de la partícula  $d_*$  y el parámetro de esfuerzo de corte excesivo  $T_*$  (Ecuación 2.68). la carga del lecho se calcula como:

$$q_h = 0,053(s - 1)^{0,5} g^{0,5} d_{50}^{1,5} T_*^{2,1} d_*^{-0,3} \quad T_* < 3 \quad (2.67)$$

$$q_h = 0,053(s - 1)^{0,5} g^{0,5} d_{50}^{1,5} T_*^{1,5} d_*^{-0,3} \quad T_* \geq 3 \quad (2.68)$$

$$T_* = \frac{\theta}{\theta_c} - 1 \quad (2.69)$$

Dónde:  $s$  es la gravedad específica,  $g$  es la aceleración de la gravedad.  $\nu$  es la viscosidad cinemática,  $\theta$  es el parámetro de Shields y  $\theta_c$  el parámetro crítico de Shields.

## Capítulo III

# Modelo hidráulico del río Madre de Dios

### **Resumen:**

*En este capítulo se describe el modelo hidráulico del río Madre de Dios construido en el Laboratorio Nacional de Hidráulica. Además, los pasos realizados para representar el lecho y medir los datos de: tirante, velocidad y batimetría del lecho.*

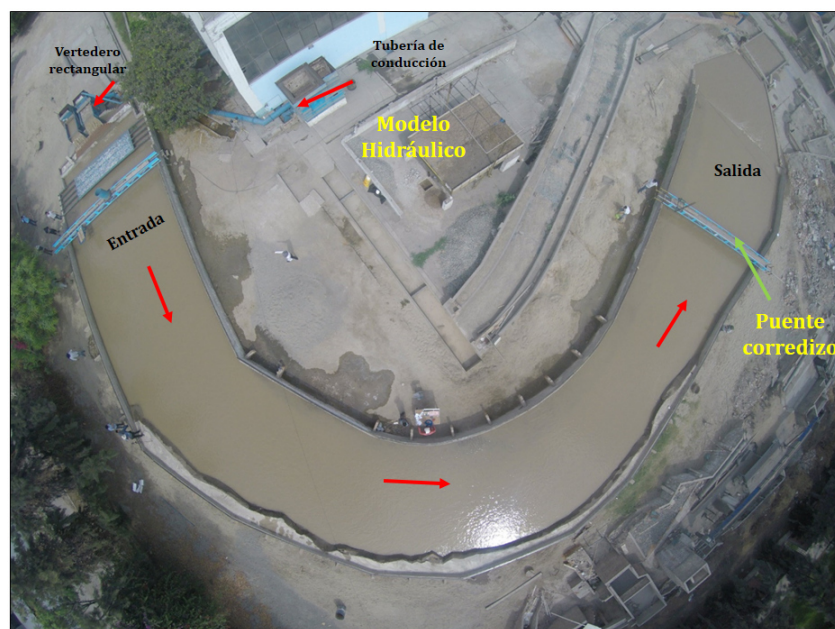
### 3.1. Similitud entre el prototipo y modelo hidráulico

Las investigaciones en un modelo hidráulico sirven para llegar a una solución de un problema específico, si hay una similitud entre el modelo y el prototipo. Teniendo en cuenta las características de los fenómenos hidráulicos por representar y las influencias de las fuerzas gravitacionales e inerciales. Para mantener la similitud entre el modelo y prototipo se ha adoptado la Ley de Froude. Además, para la adopción de la escala se tuvo en cuenta los siguientes requerimientos:

- Caudales máximos y mínimos.
- La extensión del prototipo a reproducirse en el modelo.
- Las condiciones límites elegidas que deben permitir una representación fiel de los fenómenos (niveles y velocidades).

La Figura 3.1 y la Figura 3.2 muestran el modelo hidráulico y el prototipo del tramo La Pastora en el río Madre de Dios, respectivamente.

Figura 3.1: Modelo hidráulico del río Madre de Dios - Tramo la Pastora construido en el Laboratorio Nacional de Hidráulica.



**Fuente:** Proyecto N<sup>0</sup> 358-PNICP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

Figura 3.2: Prototipo del río Madre de Dios - Tramo La Pastora.



**Fuente:** Proyecto N<sup>0</sup> 358-PNICP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

La escala de longitud fue 1/60, la cual permitió obtener los patrones de flujo y otras características del fenómeno a modelar sin distorsión. A partir de esta escala se derivaron las relaciones mostradas en la Tabla 3.1

Tabla 3.1: Relación de escalas Modelo - Prototipo

Magnitud	Factor de escala	Valor
Longitud	$L_p/L_m=L$	60
Velocidad	$V_p/V_m=L^{0,5}$	7.746
Tiempo	$T_p/T_m=L^{0,5}$	7.746
Caudales	$Q_p/Q_m=L^{5/2}$	27885.48
Rugosidad	$n_p/n_m=L^{1/6}$	1.979
Transporte de sedimentos	$T_p/T_m=L_xL_yL_\gamma$	7.746
Descarga unitaria de sedimentos	$q_p/q_m=L_\gamma L_xL_y/(T_{sp}/T_m)$	464.76

**Fuente:** Proyecto N<sup>o</sup> 358-PNCP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

**Nota:** El subíndice 'p' representa al prototipo y el subíndice 'm' representa al modelo.

Donde:

- $L_p, L_m$  Longitudes en prototipo y modelo, respectivamente.
- $V_p, V_m$  Velocidades en prototipo y modelo, respectivamente.
- $T_p, T_m$  Tiempos en prototipo y modelo, respectivamente.
- $n_p/n_m$  Rugosidad en prototipo y modelo, respectivamente.
- $T_{sp}/T_{sm}$  Tasas de transporte de sedimentos en prototipo y en modelo, respectivamente.
- $L_xL_yL_\gamma$  Relaciones de escala en la dirección x, en la dirección y, y relación de pesos específicos (prototipo - modelo).

En 2017 se reconstruyó el lecho del modelo hidráulico del río Madre de Dios en base a la relación de escalas modelo - prototipo las cuales se muestran en la Tabla 3.1. Para estudiar el lecho del río Madre de Dios en el modelo hidráulico se realizó lo siguiente:

- Se representó el lecho móvil de la zona de estudio a escala no distorsionada de 1/60.
- Se calibró el modelo hidráulico teniendo en cuenta los niveles de agua registrado en el río Madre de Dios.

### 3.2. Descripción del modelo hidráulico del río Madre de Dios - Tramo la Pastora

A partir del informe de hidrológia (*Ingeniería de Detalle - Defensas Ribereñas Sector la Pastora km 480+070 – km 480+910*), y usando la relación de escalas que se muestra en la Tabla 3.1, se obtuvo el caudal máximo y mínimo del modelo hidráulico, los que fueron usados en la etapa experimental por medio del suministro de 4 bombas.

- Caudal máximo ( $Q_{\text{máx}}$ ) =  $543 \frac{L}{s}$ .

El lecho móvil del modelo hidráulico del tramo La Pastora del río Madre de Dios fue representado en el Laboratorio Nacional de Hidráulica a escala 1/60 con las siguientes características hidráulicas:

- Longitud (L) de 50 m.
- Ancho medio (B) de 6.9 m.
- Radio de curvatura (R) de 13.8 m.
- Tirante máximo (y) de 0.25 m.

Por lo tanto, la relación  $\frac{R}{B}$  resultó 2.

Para la etapa experimental se utilizó cuatro bombas de eje vertical que permitieron suministrar caudales de hasta 550 L/s. Este caudal fué alimentado al modelo a través de tuberías de PVC de 356 mm de diametro (14 pulgadas).

Se realizó 6 experimentos para obtener la relación esperada entre el prototipo y el modelo hidráulico de las distintas variables: tirante, velocidad y batimetría. Éstas relaciones obtenidas fueron empleadas posteriormente para calibrar y validar el modelo numérico.



### 3.2.1. Detalles de replanteo del lecho del río Madre de Dios en el modelo hidráulico para el Tramo la Pastora

La información proporcionada por la empresa ODEBRECHT (Proyecto N° 358-PNICP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE) el modelo hidráulico del río Madre de Dios, cuenta con un total de 94 secciones transversales a lo largo del río desde la progresiva 0+120 hasta la progresiva 4+320. Las distancias medidas desde el eje del río hacia la margen derecha son positivas y desde el eje hacia la margen izquierda son negativas, además las secciones están separadas 1m y en la zona que describe el tramo curvo a cada 0.50 m. También se tuvo en cuenta las cotas de cada punto y el punto de referencia  $BM1 = 156.891$  msnm, entre otros, por lo que fue necesario gran minuciosidad al ejecutar el replanteo del lecho.

Los pasos seguidos para replantear al lecho en el modelo hidráulico fueron:

- a) Instalar el nivel de ingeniero a una distancia adecuada para barrer las progresivas de las secciones a trabajar durante el día.
- b) Seleccionar el BM más próximo de la zona a trabajar. Los BMs se ubican en la margen derecha del modelo físico. La mira siempre se sostiene con la ayuda de un nivel ciclar (ojo de pollo).
- c) Marcar las progresivas sobre los muros laterales del modelo, de tal manera que se pueda ubicar la progresiva de la sección a trabajar, y luego colocar la regla graduada de aluminio sobre los muros.
- d) Usando la varilla de aluminio se procedió a marcar los puntos (cotas) de la sección, a partir del eje donde los puntos ubicados a la derecha del eje son positivas (+) y a la izquierda negativas (-) de acuerdo con los datos proporcionados.

### 3.2.2. Granulometría del material del lecho

Para determinar la granulometría del lecho a la escala del modelo se tuvo en cuenta que esta no puede ser muy pequeña porque puede dejar de comportarse como material granular y presentar fuerzas intergranulares de cohesión. Este fenómeno ocurre cuando  $D < 0.1\text{mm}$ .

Por esta razón, se tomó parte de la curva granulométrica del material del lecho del río que cumple con esa condición, que se muestra en la Tabla 3.2 y la Figura 3.2.

Los diámetros característicos, se obtuvieron de Figura 3.3, siendo estos:

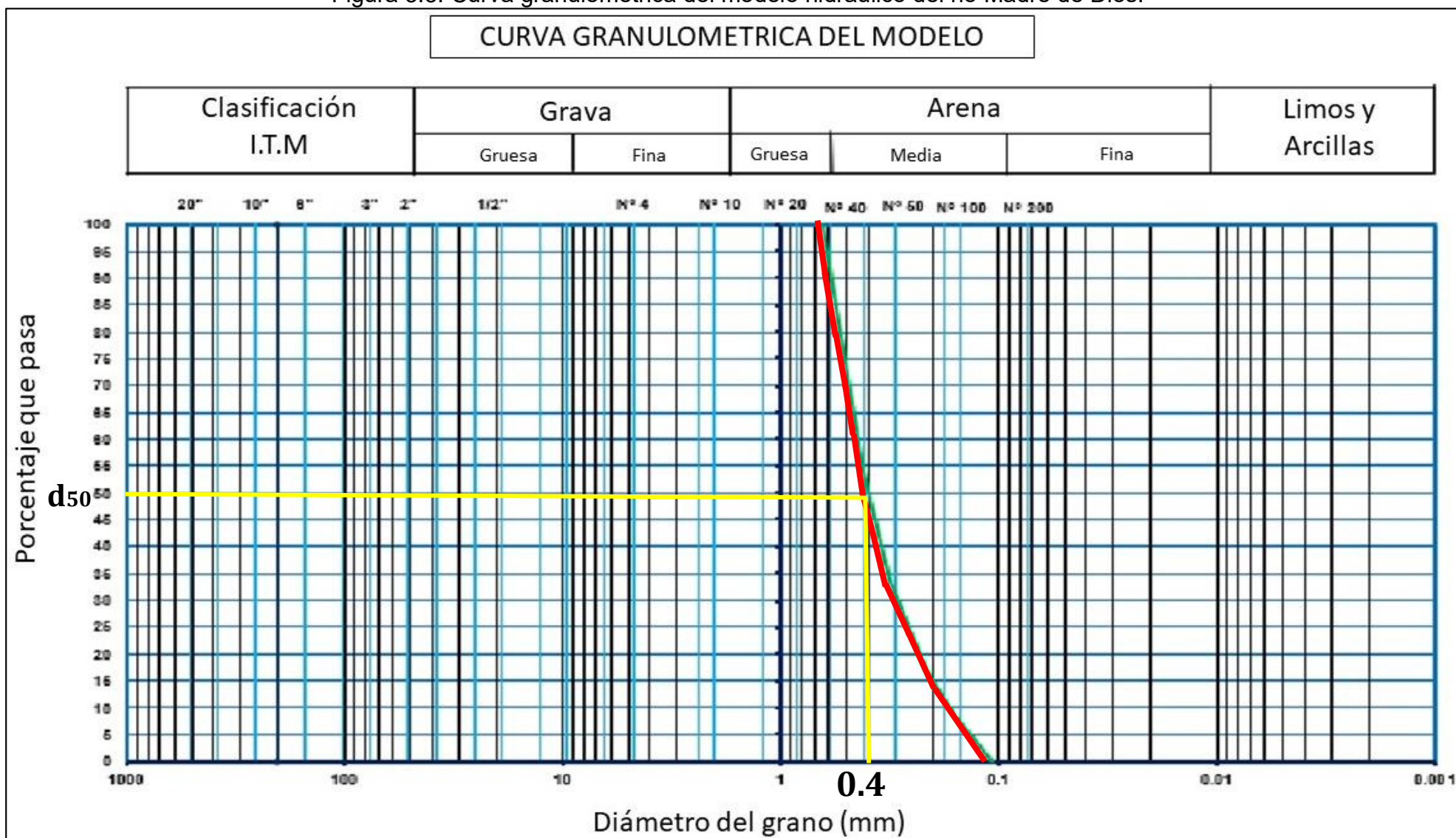
- $D_{16} = 0.220$  mm
- $D_{50} = 0.400$  mm
- $D_{84} = 0.550$  mm
- $D_{90} = 0.590$  mm

Tabla 3.2: Porcentaje que pasa o es retenido por los tamices.

Tamiz	Abertura de	% parcial	Acumulado	
-	Malla [mm]	Retenido	Retenido	Pasa
1 1/2"	38.1	-	-	100
1"	25.4	20	20	80
3/4"	19.05	9.1	29.1	70.9
1/2"	12.7	7.5	36.6	63.4
3/8"	9.525	3.5	40.1	59.9
1/4"	6.35	3.7	43.8	56.2
N <sup>o</sup> 4	4.76	2.1	45.9	54.1
N <sup>o</sup> 10	2	1.8	47.7	52.3
N <sup>o</sup> 20	0.84	0.2	47.9	52.1
N <sup>o</sup> 30	0.59	1.7	49.6	52.1
N <sup>o</sup> 40	0.426	1.6	51.2	48.8
N <sup>o</sup> 60	0.25	23.5	74.7	25.3
N <sup>o</sup> 100	0.149	19	93.7	6.3
N <sup>o</sup> 200	0.074	5.7	99.4	0.6

**Fuente:** Proyecto N<sup>o</sup> 358-PNICP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

Figura 3.3: Curva granulométrica del modelo hidráulico del río Madre de Dios.



**Fuente:** Proyecto N° 358-PNCP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

### 3.2.3. Caudal y tasa de transporte

El caudal con que se realizó la etapa experimental fue de  $490 \frac{L}{s}$ . La tasa de transporte de sedimento que se usó fue de  $0.01 \frac{kg}{s}$

## 3.3. Datos obtenidos durante los ensayos

Los ensayos en el modelo hidráulico se realizaron en febrero del 2017 con una duración de un día, donde se registraron: las velocidades en las tres direcciones (x,y,z), el tirante y la batimetría del lecho al finalizar el ensayo experimental.

### 3.3.1. Batimetría del lecho

Después de realizar la etapa experimental se realizó el levantamiento de la batimetría del cauce, por medio de un Escáner Láser el cual permitió capturar una fotografía tridimensional compuesta por millones de puntos. El trabajo con el Escáner Láser consistió en reconocer el modelo hidráulico y buscar el lugar estratégico para posesionar los puntos de control para el levantamiento de la información. Luego se procesó la información con el software del equipo; con estos pasos se obtuvo una nube de puntos que serán exportados al formato csv. A partir de la nube de puntos se generó un archivo binario de formato serafín (.slf), que es un archivo de entrada para el modelo numérico,( ver detalle en el Capítulo 5).

En la Figura 3.4 se muestra la variación del cauce después de la etapa experimental debido a la interacción entre la fuerza centrífuga causada por la curvatura del río y la gradiente vertical de la velocidad del flujo principal.

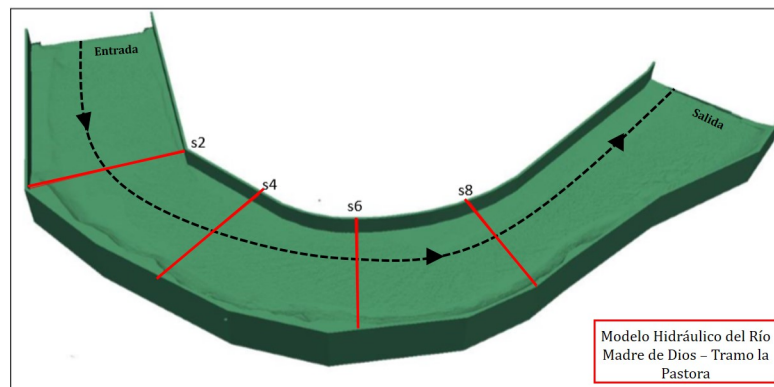
Figura 3.4: Configuración del lecho después de realizar el experimento, se observa el cambio de forma del lecho tipo duna.



**Fuente:** Proyecto N<sup>0</sup> 358-PNICP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

En la Figura 3.5 muestra la batimetría del lecho después del experimento, capturado por el Escáner Láser. Cuatro secciones transversales (s2,s4,s6,y s8) fueron analizados y usados para validar y calibrar el modelo numérico.

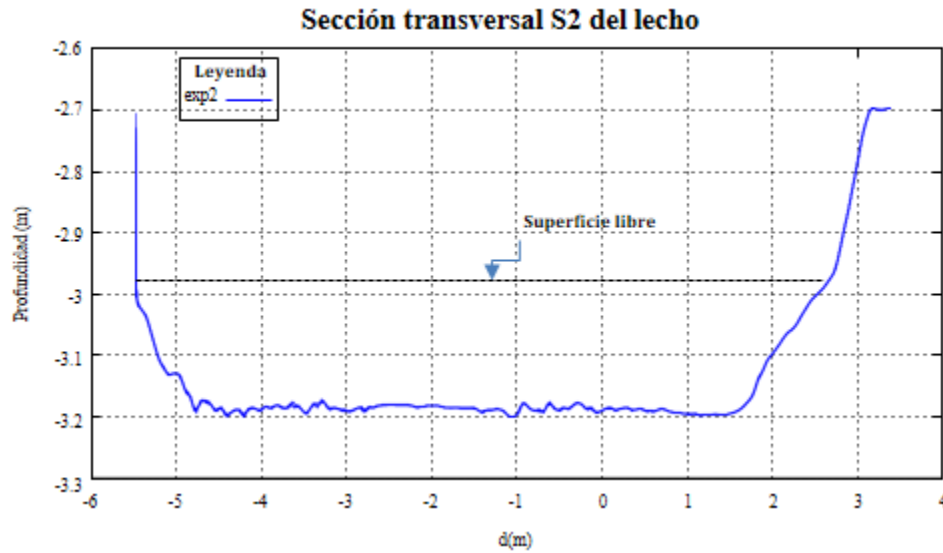
Figura 3.5: Batimetría del lecho después de la etapa experimental, capturado por un Escaner Laser, la flecha indica la dirección del flujo



**Fuente:** Proyecto N<sup>0</sup> 358-PNICP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

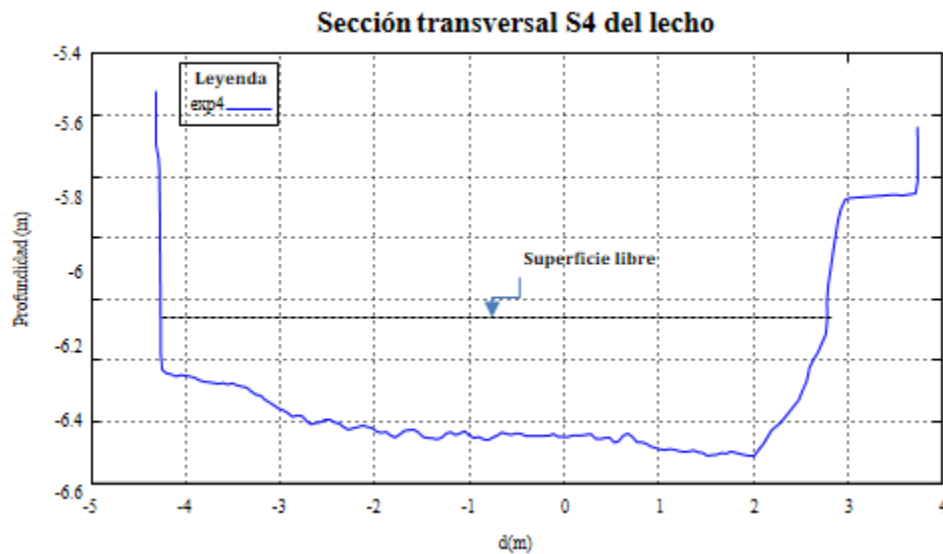
En las Figuras 3.6,3.7,3.8 y 3.9 representan las secciones transversales S2,S4,S6 y S8. Las sección S6 y S8 muestran la variación del cauce debido al proceso de erosión y sedimentación que se origino por la presencia del flujo secundario, porque las líneas de corriente de la superficie libre tienen la dirección del flujo y en el lecho tienen dirección opuesta.

Figura 3.6: Sección transversal S2, Ver Figura 3.5.



**Fuente:** Proyecto N<sup>o</sup> 358-PNICE-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

Figura 3.7: Sección transversal S4, Ver Figura 3.5.



**Fuente:** Proyecto N<sup>o</sup> 358-PNICE-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

Figura 3.8: Sección transversal S6, Ver Figura 3.5.



*Fuente:* Proyecto N<sup>o</sup> 358-PNICE-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

Figura 3.9: Sección transversal S8, Ver Figura 3.5.



*Fuente:* Proyecto N<sup>o</sup> 358-PNICE-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

### 3.3.2. Medición de las velocidades

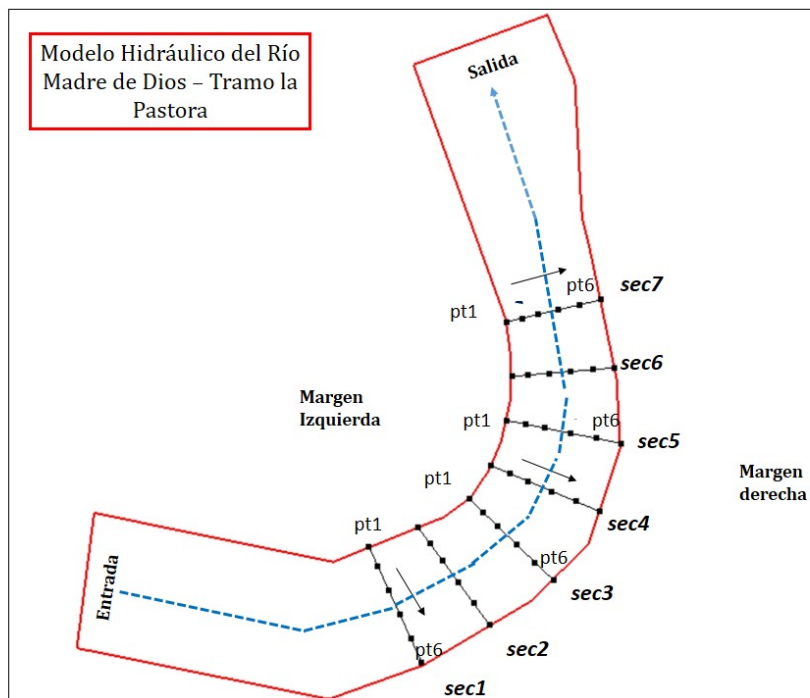
El acopio de datos de velocidades en el modelo se realizó con el velocímetro acústico biestático (perfilador-vectrino) que puede medir las fluctuaciones rápidas de velocidad.



La medición de velocidad se basa en el efecto Doppler que consiste en enviar un pulso acústico corto desde un transductor activo. Cuando dicho pulso atraviesa el punto donde se orientan los transductores pasivos, el eco es registrado por cada uno de los haces. Las señales son procesadas para determinar sus desviaciones Doppler para luego ajustar la escala en base a la velocidad de propagación del sonido en el agua dando como resultado la velocidad en las tres direcciones. Estas velocidades se almacenan en un computador para luego ser analizados. Se tomaron velocidades en siete secciones transversales, medidas desde la margen izquierda hacia la margen derecha en seis puntos desde la superficie libre hasta 5cm encima del fondo del lecho.

En la Figura 3.10 muestra las sección sec1, sec2, sec3, sec4, sec5, sec6 y sec7 donde se registro la velocidad en las tres direcciones con el velocímetro acústico.

Figura 3.10: Siete secciones transversales en planta y distribución de las velocidades en seis puntos medidos desde la margen derecha hacia la margen izquierda.



*Fuente: Elaboración propia.*

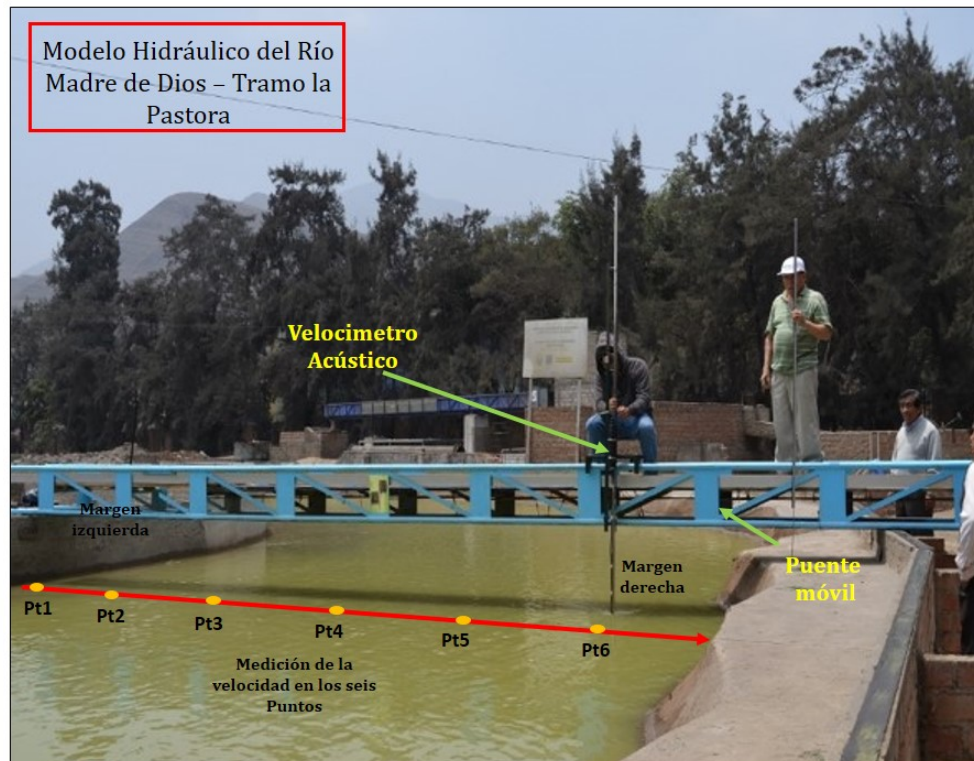
A continuación se muestran los pasos realizados para registrar las velocidades en las secciones (sec1, sec2, sec3, sec4, sec5, sec6, y sec7).

En la Figura 3.11 muestra la sección sec1 donde se registraron las velocidades con el



velocímetro acústico medidos desde la margen izquierda a la margen derecha utilizando un puente corredizo que fué alineado en cada sección transversal.

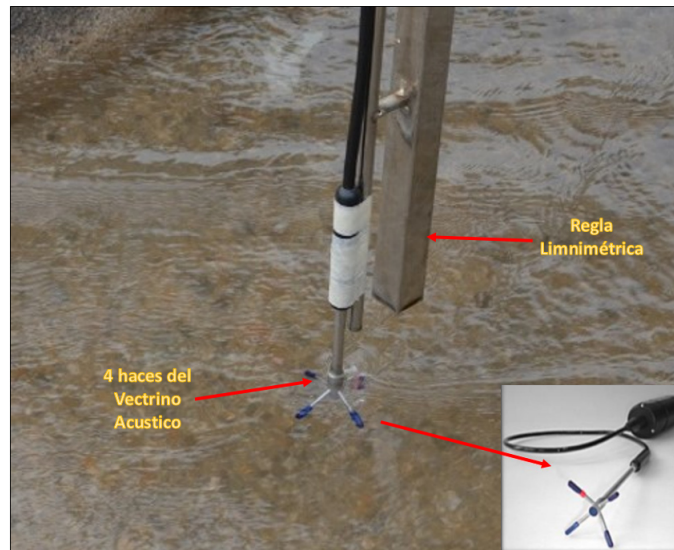
Figura 3.11: Las velocidades se midieron con Velocímetro Acústico Doppler en las siete secciones transversales



**Fuente:** Proyecto N<sup>o</sup> 358-PNICP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

En la Figura 3.12 muestra el Velocímetro Acustico Biestatico que tiene 4 haces, que permiten capturar los pulsos de las desviaciones en las tres direcciones.

Figura 3.12: Velocímetro Acústico Biestático está colocado a una distancia de 5cm por encima del lecho.



**Fuente:** Proyecto N<sup>0</sup> 358-PNICP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

En la Figura 3.13 se muestra una laptop donde fueron almacenados los datos de las velocidades en las tres direcciones  $(v_x, v_y, v_z)$ , los que fueron procesados con el lenguaje de programación Matlab que consistió en ordenar las variables en las tres direcciones y exportar en el archivo Excel de extensión csv.

Figura 3.13: Registro y almacenamiento de las velocidades en una laptop para su posterior procesamiento



**Fuente:** Proyecto N<sup>0</sup> 358-PNICP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

### 3.3.2.1. Velocidad media

A partir de los datos de velocidad  $(v_x, v_y, v_z)$  medidos en los seis puntos en cada sección transversal, se calculó la velocidad media por el método del trapecio, tal como muestra la Tabla 3.3.

A partir de los datos calculados en seis puntos de cada sección transversal haciendo un total de 42 datos puntuales de velocidad media los cuales fueron usados para calibrar y validar los resultados del modelo numérico. Los datos de velocidad medidos en el modelo se muestra en el Anexo 3.

Tabla 3.3: Velocidades medias en seis puntos de cada sección transversal

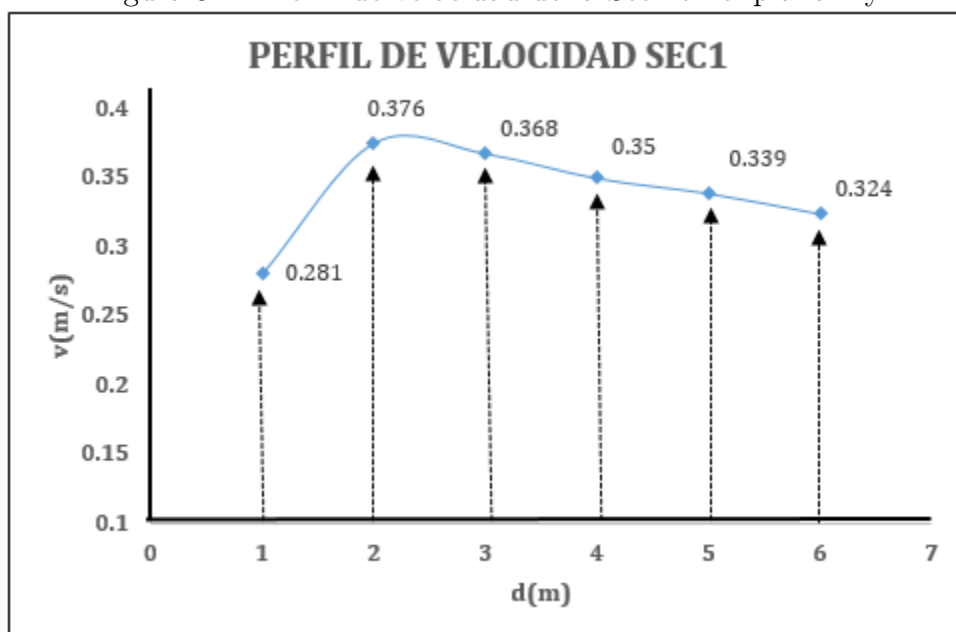
Secciones	pt1	pt2	pt3	pt4	pt5	pt6
	v[m/s]	v[m/s]	v[m/s]	v[m/s]	v[m/s]	v[m/s]
sec1	0.324	0.339	0.350	0.367	0.375	0.281
sec2	0.390	0.423	0.443	0.483	0.461	0.359
sec3	0.409	0.431	0.462	0.443	0.408	0.050
sec4	0.406	0.401	0.394	0.369	0.250	0.027
sec5	0.420	0.351	0.336	0.284	0.234	0.003
sec6	0.479	0.382	0.338	0.334	0.282	0.024
sec7	0.256	0.317	0.296	0.322	0.286	0.081

**Fuente:** Proyecto N<sup>o</sup> 358-PNCP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

A continuación en las Figuras 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20 representan las secciones sec1, sec2, sec3, sec4, sec5, sec6, y sec7 que son los perfiles de velocidad en el plano x-y.

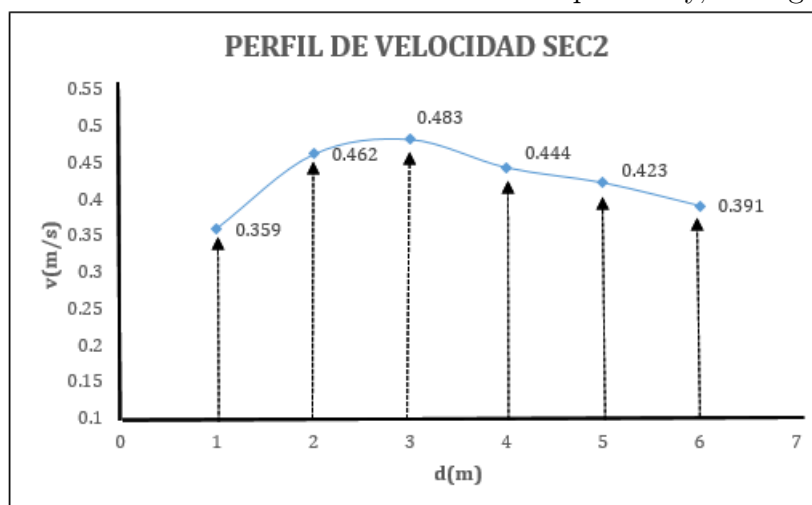
Las Figuras 3.14, 3.15 y 3.16 corresponden a las secciones del tramo recto el perfil. Se observa que la velocidad tiene mayores valores en las proximidades de la parte central de la sección. A partir de la Figura 3.17 a 3.20 el perfil de velocidad varia debido a la curvatura del cauce, debido a la variación de la gradiente de velocidad y la fuerza centrífuga.

Figura 3.14: Perfil de velocidad de la Sec1 en el plano x-y.



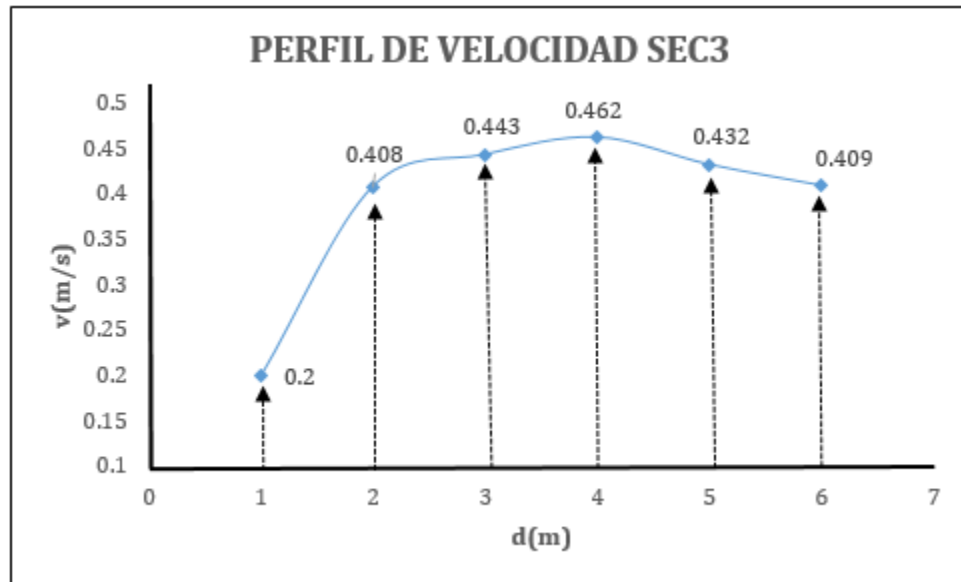
*Fuente: Elaboración propia.*

Figura 3.15: Perfil de velocidad de la Sec2 en el plano x-y, ver Figura 3.10.



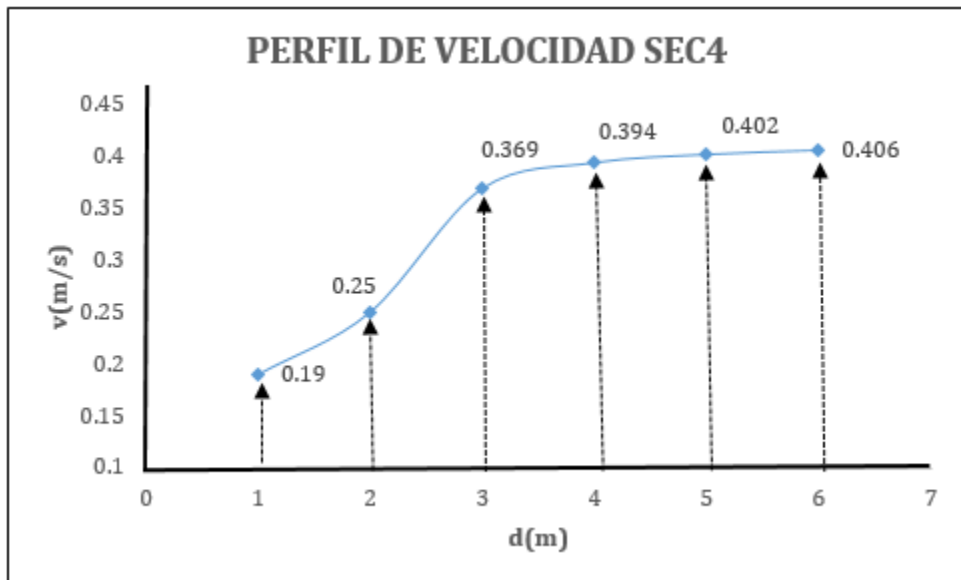
*Fuente: Elaboración propia.*

Figura 3.16: Perfil de velocidad de la Sec3 en el plano x-y, ver Figura 3.10.



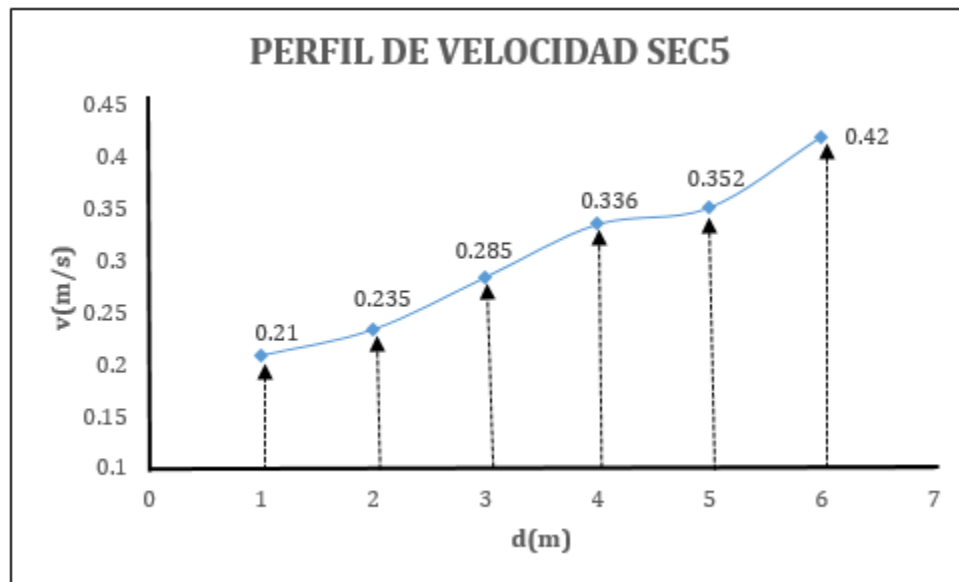
*Fuente:* Elaboración propia.

Figura 3.17: Perfil de velocidad de la Sec4 en el plano x-y, ver Figura 3.10.



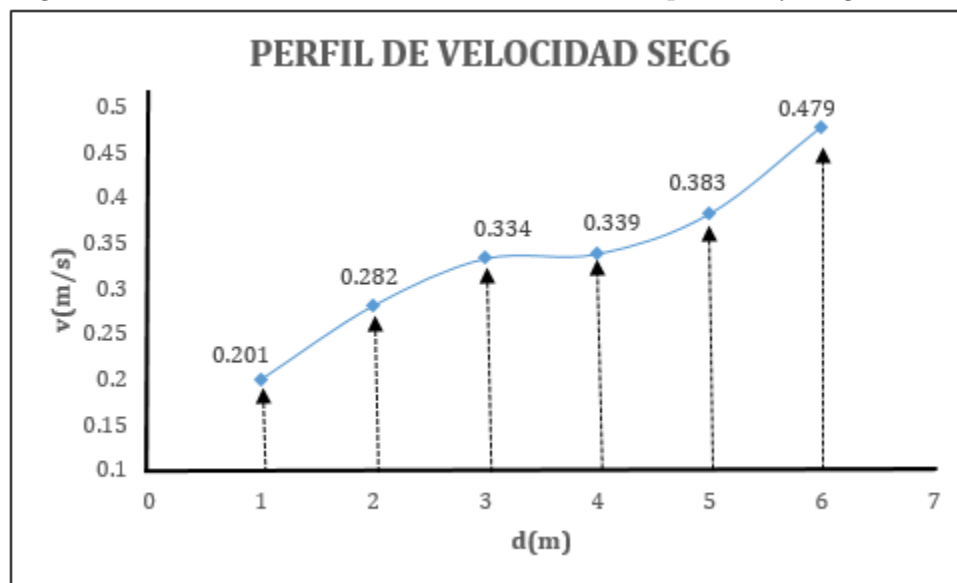
*Fuente:* Elaboración propia.

Figura 3.18: Perfil de velocidad de la Sec5 en el plano x-y, ver Figura 3.10.



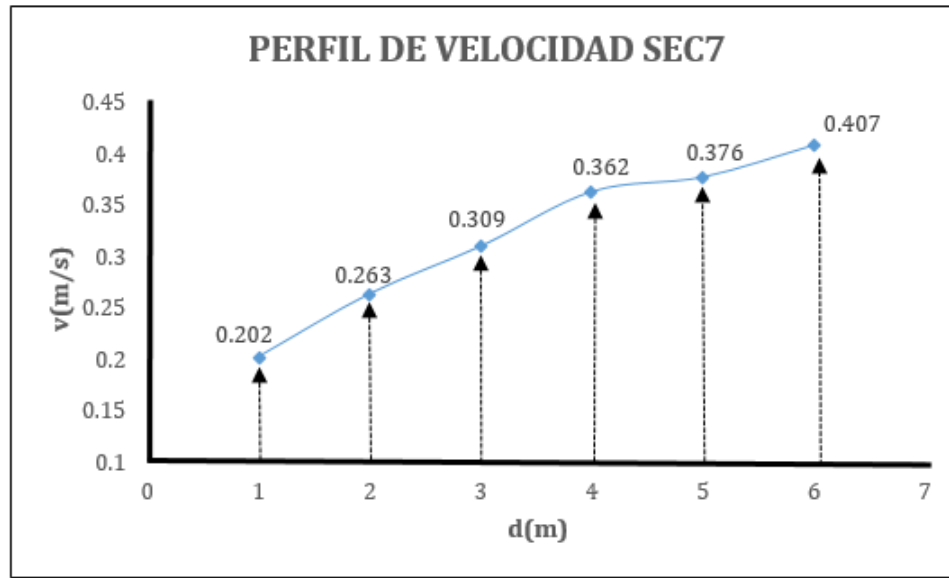
*Fuente: Elaboración propia*

Figura 3.19: Perfil de velocidad de la Sec6 en el plano x-y, Figura 3.10.



*Fuente: Elaboración propia*

Figura 3.20: Perfil de velocidad de la Sec7 en el plano x-y, ver Figura 3.10.



*Fuente: Elaboración propia*

### 3.3.2.2. Tirantes

En el modelo hidráulico se midieron los tirantes en las siete secciones transversales desde la margen izquierda hacia la margen derecha. (Ver Tabla 3.4)

Se midió la cota con el nivel de anteojo en la superficie libre y el fondo, por diferencia de cotas se obtuvo el tirante en los seis puntos de la sección transversal medidos desde la margen izquierda a la margen derecha.

Tabla 3.4: Tirantes en seis puntos en las secciones 1,2 hasta 7 medidos desde la margen izquierda hacia la margen derecha

Ptos	sec1	sec2	sec3	sec4	sec5	sec6	sec7
-	y[m]	y[m]	y[m]	y[m]	y[m]	y[m]	y[m]
p1	0.241	0.243	0.224	0.216	0.260	0.258	0.289
p2	0.208	0.211	0.232	0.223	0.227	0.249	0.248
p3	0.205	0.185	0.200	0.194	0.202	0.205	0.222
p4	0.182	0.177	0.171	0.162	0.183	0.149	0.207
p5	0.160	0.159	0.152	0.143	0.171	0.127	0.161
p6	0.151	0.117	0.131	0.122	0.127	0.123	0.121

*Fuente: Proyecto N° 358-PNICP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.*

# Capítulo IV

## Sistema Open TELEMAC MASCARET

### **Resumen:**

*En este capítulo se describe el sistema hidroinformático Open TELEMAC MASCARET y sus componentes como: TELEMAC-2D y SISYPHE. Además, se describen los esquemas numéricos y los algoritmos de solución implementados para resolver el sistema de ecuaciones.*

### 4.1. Descripción del software

El sistema open TELEMAC MASCARET es una herramienta de modelización numérica que tiene diferentes módulos para analizar el movimiento del agua y sedimento en el dominio fluvial, costa, estuario y lacustre. Para realizar una simulación numérica comprende los siguientes pasos: "pre-procesamiento", para digitalizar los datos y describir el problema; "simulación", para calcular las propiedades del fluido en el dominio discretizado y "post-procesamiento", para mostrar y analizar los resultados.

El Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) de Electricidad de Francia (EDF), originalmente desarrolló el programa teniendo en cuenta la comunicación entre programas.

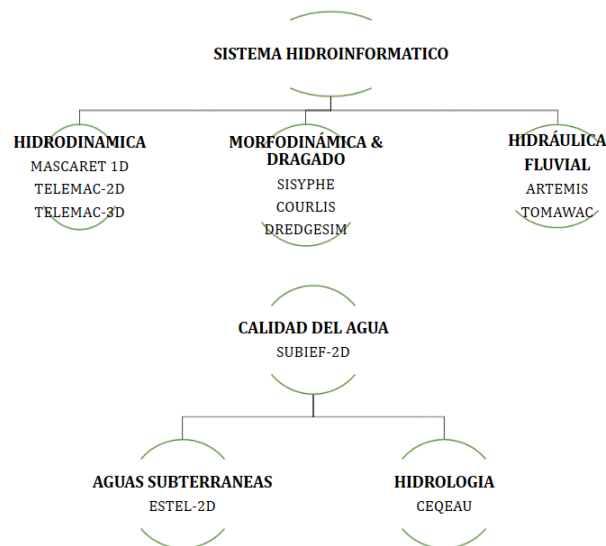


El programa es ampliamente utilizado, comercializado y desarrollado por SOGREAH Consultants, en estrecha colaboración con EDF-LNHE.

El sistema open TELEMAC MASCARET utiliza principalmente el método de discretización de elementos finitos. También incluye el método de volúmenes finitos para el análisis de flujo bidimensional y transporte de sedimentos no-cohesivos. Todos los módulos son compilados y ejecutados usando el lenguaje de programación FORTRAN.

A continuación se muestra los módulos que tiene implementado el software Open Telemac Mascaret para realizar una simulación numérica en aguas superficiales, costas, aguas subterráneas, calidad de agua e hidrológica.

Figura 4.1: Módulos del software Open Telemac Mascaret.



*Fuente:Elaboración propia*

## 4.2. Características del sistema open TELEMAC MASCARET

Tal como se ha mencionado previamente, el sistema Open TELEMAC MASCARET se puede dividir en tres partes distintas: pre-procesamiento, simulación y post-procesamiento.

Cada uno de estas partes implica el uso de diferentes módulos.

El pre-procesamiento implica generar la malla con el uso del módulo (MATISSE) o el software Blue Kenue.

La simulación comprende en usar el módulo hidrodinámico (TELEMAC-2D y TELEMAC-3D), transporte de sedimentos (SISYPHE y SEDI-3D), propagación de ondas en áreas costeras (TOMAWAC), propagación de las olas hacia la costa o hacia los puertos (ARTEMIS), calidad del agua (SUBIEF-2D y SUBIEF-3D) y agua subterránea (ESTEL-2D y ESTEL-3D).

El post-procesamiento incluye RUBENS-2D y POSTEL-3D, son módulos que permiten visualizar los resultados bidimensionales y tridimensionales respectivamente.

Para este estudio se usó Blue Kenue, para generar la malla no estructurada de elementos triangulares; TELEMAC-2D, está diseñado para el cálculo de las variables hidrodinámicas en un campo bidimensional; SISYPHE, calcula las variables de transporte de sedimentos y la evolución del lecho a partir de las variables hidrodinámicas calculados con TELEMAC-2D y ParaView para visualización de los resultados.

El programa tiene implementado una biblioteca de elementos finitos BIEF en el sistema Open TELEMAC MASCARET, para permitir el intercambio de resultados durante la simulación con los diferentes módulos. Esta biblioteca ha sido especialmente diseñada para varios algoritmos numéricos que resuelve las ecuaciones clásicas de mecánica de fluidos. Otra librería UTILE es usado para controlar la entrada-salida (Input/Output).

### 4.3. Entorno computacional

Los principales módulos de simulación están codificados en FORTRAN 90. Por lo tanto, se puede ejecutar en todos los entornos de trabajo que operan bajo UNIX, WINDOWS. El software es protegido usando HASP (Hardware Against Software Piracy).

## 4.4. Modulo hidrodinámico TELEMAC-2D

El módulo TELEMAC-2D resuelve las cuatro ecuaciones hidrodinámicas, que son promediadas en la profundidad también conocidas como las ecuaciones de Saint Venant que derivan de las ecuaciones de Navier-Stokes, sin embargo, necesita ciertos supuestos y aproximaciones para los términos no lineales (TELEMAC-2D, 2001; BIEF, 2004).

Las siguientes ecuaciones son resueltas simultáneamente en una simulación de flujo bidimensional asumiendo la distribución de la presión hidrostática (TELEMAC-2D, 2002).

**Ecuación de continuidad:**

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \cdot \vec{\nabla}(h) + h \operatorname{div}(\vec{u}) = 0 \quad (4.1)$$

**Ecuación de momento:**

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \operatorname{grad} u = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_t \vec{\nabla} u) \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_t \vec{\nabla} v) \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(T) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_T \vec{\nabla} T) \quad (4.4)$$

Dónde:

- $h$  (m) profundidad de agua.
- $u$  y  $v$  (m/s) componentes del vector velocidad  $U$ .
- $T$  (g/l) trazador pasivo.
- $g$  ( $m/s^2$ ) aceleración de la gravedad.
- $v_t$  ( $m^2/s$ ) viscosidad turbulenta.
- $v_T$  ( $m^2/s$ ) coeficiente de difusión de tracer.

- $Z$  (m) elevación de superficie libre.
- $t$  (s) tiempo.
- $S_h$  (m/s) fuente y sumidero del fluido.
- $S_x, S_y$  ( $m^2$ ) termino fuente y sumidero en las ecuaciones dinámicas.
- $S_T$  (g/l/s) sumidero y fuente del tracer.  $h, u, v$  y  $T$  son ecuaciones que serán calculadas.

$S_x$  y  $S_y$   $m/s^2$  son los términos fuente que representan al viento, la fuerza de Coriolis, la fuerza de fricción. Los diferentes términos de las ecuaciones anteriores son resueltas en uno o más de dos pasos (en el caso de advección por el método de las característica):

- Advección de profundidad de agua ( $h$ ), componentes del vector velocidad ( $u, v$ ) y trazador pasivo  $T$ .
- propagación, difusión y fuente de las ecuaciones dinámicas.
- Difusión y término fuente de las ecuaciones de transporte.

Este estudio requirió la solución de las ecuaciones anteriores junto con el modelo  $k-\varepsilon$ , usando el método de paso fraccional y el método de las características, para calcular las componentes de velocidad ( $u$  y  $v$ ), la energía cinética turbulenta  $k$  y disipación  $\varepsilon$ . Se considera el esquema SUPG (Streamline Upwind Petrov-Galerkin) para la solución del termino advección de la profundidad  $h$ .

Los términos de advección, propagación y difusión en la ecuación (4.2) son resueltos separadamente por TELEMAC-2D en cada nodo discretizado entre el tiempo  $t^n$  y el tiempo  $t^{n+1}$  (denominado paso de tiempo  $t$ ). Las siguientes ecuaciones son resueltas por TELEMAC-2D durante el tiempo de paso del término advección:

$$\frac{\bar{h} - h^n}{\Delta t} + ugrad(h) = 0 \quad (4.5)$$

$$\frac{\bar{u} - u^n}{\Delta t} + ugrad(u) = 0 \quad (4.6)$$

$$\frac{\bar{v} - v^n}{\Delta t} + ugrad(v) = 0 \quad (4.7)$$

$$\frac{\bar{\kappa} - \kappa^n}{\Delta t} + ugrad(\kappa) = 0 \quad (4.8)$$

$$\frac{\bar{\varepsilon} - \varepsilon^n}{\Delta t} + ugrad(\varepsilon) = 0 \quad (4.9)$$

Las siguientes ecuaciones son resueltas por TELEMAC-2D durante la propagación y la difusión:

$$\frac{h^{n+1} - \bar{h}}{\Delta t} + hdiv(u) = 0 \quad (4.10)$$

$$\frac{u^{n+1} - \bar{u}}{\Delta t} = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{h} div[h\nu_t grad(u)] + F_{Mx} \quad (4.11)$$

$$\frac{v^{n+1} - \bar{v}}{\Delta t} = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{1}{h} div[h\nu_t grad(u)] + F_{My} \quad (4.12)$$

Las siguientes ecuaciones son resueltas por TELEMAC-2D durante la solución del modelo  $\kappa - \varepsilon$ .

$$\frac{k^{n+1} - \bar{k}}{\Delta t} - div\left[\frac{\nu_t}{\sigma_k} grad(k)\right] = P + P_{kv} - \varepsilon \quad (4.13)$$

$$\frac{\varepsilon^{n+1} - \bar{\varepsilon}}{\Delta t} - div\left[\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} grad(\varepsilon)\right] = PC_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} + P_{\varepsilon v} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (4.14)$$

Donde  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{\kappa}$  y  $\bar{\varepsilon}$  son los valores intermedios de  $u, v, k, \varepsilon$  con el mismo paso de tiempo durante la advección. La viscosidad  $\nu_t$  se calcula mediante el modelo de turbulencia utilizando el valor de la energía cinética y disipación  $\varepsilon$ .

$$\nu_t = C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (4.15)$$

Los términos:  $F_{Mx}$  y  $F_{My}$  son los términos fuente. Este estudio ignora toda fuente excepto la fricción de fondo. Los valores del término fuente debido a la fricción del fondo puede ser simulado de acuerdo con la Ley de Fricción de Chezy, que originalmente se deriva para un flujo uniforme. Teniendo en cuenta un dominio plano y la naturaleza no lineal de la ecuación de Chezy, que son calculados como:

$$F_{Mx} = \frac{g}{hC_h^2} u^{n+1} \sqrt{(u^n)^2 + (v^n)^2} \quad (4.16)$$

$$F_{My} = \frac{g}{hC_h^2} u^{n+1} \sqrt{(u^n)^2 + (v^n)^2} \quad (4.17)$$

En este estudio se considera el tratamiento numérico adicional para la solución de los términos no lineales; es decir,  $h \operatorname{div}(u)$ . Esto se hace especificando el coeficiente del término implícito de la velocidad y profundidad. La ecuación (4.18) se resuelve con el mismo tiempo de paso teniendo en cuenta la profundidad de propagación  $h_{prop}$ .

$$h \operatorname{div}(u) = h_{prop} \operatorname{div}[\theta_u u_{n+1} + (1 - \theta_u) u^n] \quad (4.18)$$

$$h_{prop} = \theta_h h^{n+1} + (1 - \theta_h) h_n \quad (4.19)$$

Donde:  $\theta_u$  es el valor implícito de la velocidad y  $\theta_h$  es el valor implícito de la profundidad.

El término de difusión se trata de manera similar, utilizando los coeficientes para la difusión de velocidades, el término de difusión es aproximado por la ecuación (4.19) y resuelto definiendo el valor implícito de la velocidad  $\theta_d$

$$\operatorname{div}[v_t \operatorname{grad}(u)] = \operatorname{div}[v_t \operatorname{grad} \theta_d u^{n+1} + (1 - \theta_d) u_n] \quad (4.20)$$

Finalmente, el cambio de profundidad  $h$  se calcula durante la solución de los términos:  $-g \frac{\partial Z}{\partial x}$  y  $-g \frac{\partial Z}{\partial y}$ . Esto es aproximado al resolver la ecuación (4.20).

$$-g \operatorname{grad}(Z) = -g \theta_h \operatorname{grad}(\delta h) - g \operatorname{grad}(h_n + Z_f) \quad (4.21)$$

En cada paso del tiempo, el cambio de la profundidad se agrega a la profundidad inicial para obtener la superficie libre y continúa para el paso de tiempo sucesivo, (TELEMAC-2D, 2001; BIEF, 2004)

Cabe señalar que las ecuaciones de Saint-Venant para dos dimensiones supone insignificante velocidad vertical. Esto está relacionado con la condición hidrostática que descuida la aceleración vertical.

## 4.5. Modulo de transporte de sedimentos SISYPHE

SISYPHE es el módulo de transporte de sedimentos no cohesivos y evolución del lecho. Utiliza fórmulas empíricas que pueden expresarse en función de diversos parámetros hidrodinámicos y de sedimento.

Este módulo no puede ser calculado en el campo de flujo independientemente, por lo tanto,

las variables hidrodinámicas se imponen en el modelo usando programación en FORTRAN, que consiste en el intercambio de resultados de las variables hidrodinámicas y transporte de sedimentos, que es calculado por el acoplamiento de TELEMAC-2D y SISYPHE. La evolución de lecho es resuelta en cada nodo para calcular el cambio de espesor del sedimento utilizando la ecuación de balance de masa.

$$(1 - n_p) \frac{\partial Z_f}{\partial t} + \text{div}(Q_s) = 0 \quad (4.22)$$

Donde  $n_p$  es la porosidad del lecho,  $Z_f$  es la elevación del lecho y  $Q_s$  es el transporte de sedimento por unidad volumen. Las siguientes fórmulas de transporte de sedimentos son programadas en SISYPHE para el cálculo de transporte  $Q_s$  (SISYPHE, 2004).

- Meyer-Peter & Muller (1948).
- Einstein & Brown (1950).
- Engelund & Hansen (1967).
- Bijker (1968).
- Bailard (1981)
- Van Rijn (1984)
- Dibajnia & Watanabe (1992)
- Hunziker (1995)
- Soulsby & Van Rijn (1997)

La descripción de estas fórmulas se puede encontrar en referencias relevantes mencionadas anteriormente: Van Rijn (1993), Yang (1996) y SISYPHE (2004). Por simplicidad, SISYPHE (2004) considera todas estas fórmulas en función del parámetro Shields  $\theta$ . En este estudio se utilizó la fórmula de Meyer-Peter & Müller (1948), Einstein *et al.* (1950), Van Rijn *et al.* (1993).

### 4.5.1. Modificación de la magnitud y dirección de la carga del lecho

Tres aspectos claves que deben de considerarse al calcular la magnitud y dirección de la carga del lecho, (SISYPHE, 2004).

- Efecto de la pendiente del lecho.
- Efecto del flujo secundario en la dirección del esfuerzo cortante, también conocidos como flujo helicoidal.
- El esfuerzo cortante del lecho se divide en dos componentes: la fricción superficial y la fuerza de arrastre debido a la forma del lecho.

#### 4.5.1.1. Efecto de la pendiente del lecho

Generalmente, el criterio del movimiento incipiente del sedimento y el transporte de sedimentos es descrito para condiciones de lecho plano. En realidad, el lecho de los ríos son raramente planos y las partículas normalmente se encuentran con una pendiente.

El efecto de la pendiente es aumentar la tasa de transporte del material en la dirección descendente de la pendiente, y para reducirla cuesta arriba.

Este estudio consideró un factor de corrección tanto para la magnitud como para la dirección de la tasa de transporte sólido antes de resolver la ecuación de evolución del lecho.

El método de corrección se basa en Koch y Flokstra (1981), que es la intensidad de la tasa de transporte sólido multiplicada por un factor SF para tener en cuenta el cambio en la coordenada vertical y en la coordenada horizontal a lo largo de la dirección del lecho.

$$SF = 1 - \beta \frac{\partial Z_f}{\partial m} \quad (4.23)$$

Donde: m es la coordenada en la dirección actual y  $\beta$  es una constante empírica que varía entre 0.6 y 1.3.

El factor de corrección debido al cambio de dirección de transporte sólido se aplica considerando la dirección del transporte sólido  $\alpha_a$  y la dirección del esfuerzo cortante de fondo  $\delta_a$  en relación con la dirección del flujo. Si r es la coordenada a lo largo del eje perpendicular al flujo (transversal o vertical) entonces el cambio en la dirección del transporte sólido se toma



en cuenta usando la siguiente ecuación:

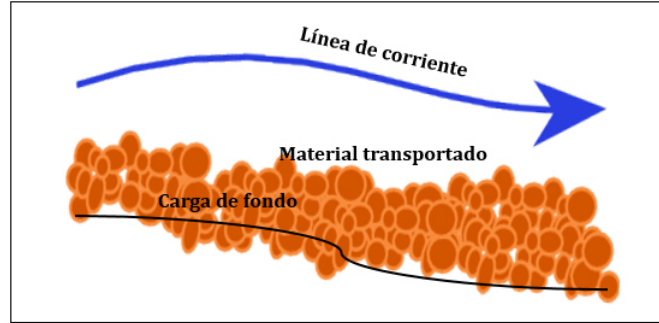
$$\tan\alpha_a = \tan\delta_a - \beta \frac{\partial Z_f}{\partial r} \quad (4.24)$$

El valor de la constante empírica  $\beta = 1,3$  se usa de acuerdo con SISYPHE (2004).

El efecto de la pendiente del lecho es similar al agregar el término de difusión en la ecuación de evolución del lecho (Ecuación de Exner). Este valor puede tender a suavizar los resultados y reducir las inestabilidades. Esta formulación; sin embargo, no incluye el efecto del ángulo de fricción y solo es aplicable para una pendiente suave.

A continuación, en la Figura 4.2 muestra que el material no-cohesivo es afectado por la pendiente del lecho. El módulo SISYPHE considera efecto de la pendiente en el calculo de tasa de transporte de sedimentos.

Figura 4.2: Pendiente del lecho en el transporte del material de fondo y suspensión.



Fuente: [www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org)

#### 4.5.1.2. Corrección del esfuerzo cortante en la dirección del flujo secundario

Debido al efecto del flujo secundario la dirección de transporte de sedimentos no coincide totalmente con la dirección del esfuerzo cortante.

Engelund (1967) propuso una expresión semi-empírica para incorporar esos efectos en modelos bidimensionales promediados en la profundidad, se refiere a la corrección transversal de la vorticidad. El esfuerzo cortante en la dirección del flujo principal puede ser escrito como:

$$\tau^* = \frac{C_f}{2} \rho |u| u \quad (4.25)$$

El esfuerzo cortante del lecho en la dirección transversal puede ser escrito como:

$$\tau_{secn} = \tau^* \tan\Delta\delta \quad (4.26)$$

Con:

$$\delta = \tan^{-1} \frac{v}{u} - \tan^{-1} \frac{Ah}{r_s} = \delta^* - \Delta\delta \quad (4.27)$$

El término  $\Delta\delta$  tiene en cuenta el efecto del movimiento espiral sobre las partículas de sedimento. Los ángulos  $\delta^*$  y  $\Delta\delta$  indican respectivamente la dirección del esfuerzo cortante del lecho (que coincide con la dirección de la velocidad promediada en la profundidad) y la dirección debido al efecto de la corriente secundaria. El cos y sen del ángulo  $\delta^*$  puede ser calculado por:

$$\cos\delta^* = \frac{\tau_x^*}{|\tau^*|} \quad \sin\delta^* = \frac{\tau_y^*}{|\tau^*|} \quad (4.28)$$

Donde:  $\tau_x^*$  y  $\tau_y^*$  son los componentes del esfuerzo cortante del lecho a partir de las ecuaciones de momentum relacionados con los campos de velocidad promediados en la profundidad, con módulo  $|\tau^*| = \sqrt{(\tau_x^*)^2 + (\tau_y^*)^2}$ . Se han propuesto varias expresiones para el coeficiente espiral A.

Engelund & Hansen (1967) uso un coeficiente constante A = 7 y (Struiksmas et al.) propuso:

$$A = \frac{2\varepsilon}{k^2} \left(1 - \frac{\sqrt{g}}{kC}\right) \quad (4.29)$$

Para los canales curvos, la pendiente de la superficie del agua se puede aproximar por:

$$g \frac{\partial z_s}{\partial n} \approx \frac{\alpha' |u|^2}{R} \quad (4.30)$$

Donde:  $z_s$  es la elevación de la superficie del agua y  $\alpha'$  un coeficiente que contabiliza si el lecho es liso o rugoso,  $0,75 \leq \alpha' \leq 1$ .

El radio de curvatura puede expresarse entonces por:

$$R = \frac{\alpha' (|u|)^2}{g \frac{\partial z_s}{\partial n}} \quad (4.31)$$

La derivada normal de la elevación de la superficie del agua puede ser calculado como:

$$\frac{\partial z_s}{\partial n} = n \cdot \nabla z_s = \frac{u \frac{\partial z_s}{\partial y} - v \frac{\partial z_s}{\partial x}}{|u|} \quad (4.32)$$

Al reemplazar la ecuación (4.30) en ecuación (4.31):

$$R = \frac{\alpha' (|u|)^3}{g \left( \frac{u \partial z_s}{\partial y} - v \frac{\partial z_s}{\partial x} \right)} \quad (4.33)$$

Por ecuación (4.25), el esfuerzo cortante debido al flujo secundario está dado por:

$$\tau^{sec} = \frac{C_f}{2} \rho \frac{Ah}{\alpha'} g |u| \frac{1}{R} \quad (4.34)$$

Con componentes:

$$\tau_x^{sec} = \tau_{sec} v \quad (4.35)$$

$$\tau_y^{sec} = \tau_{sec} (-u) \quad (4.36)$$

Finalmente, las componentes del esfuerzo cortante del lecho que incluye la influencia de las corrientes secundarias son:

$$\tau_x^{sec} = \tau_x^* + \tau_x^{sec} \quad (4.37)$$

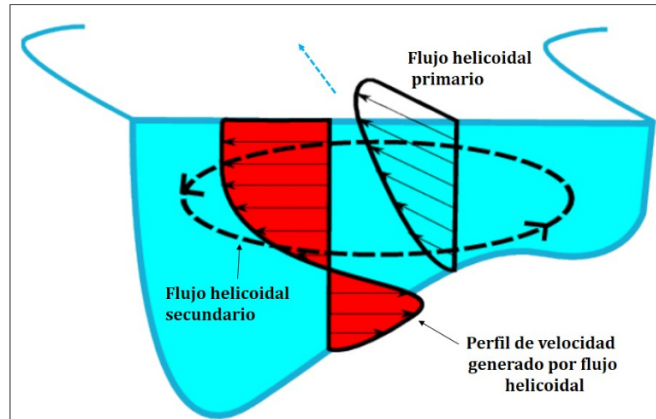
$$\tau_y^{sec} = \tau_y^* + \tau_y^{sec} \quad (4.38)$$

con:

$$\cos(\delta) = \frac{\tau_x^{sec}}{\tau^{sec}} \quad \sin(\delta) = \frac{\tau_y^{sec}}{\tau^{sec}} \quad (4.39)$$

y  $|\tau^{sec}| = \sqrt{(\tau_x^{sec})^2 + (\tau_y^{sec})^2}$  el módulo del esfuerzo cortante del lecho, incluye el efecto de la corriente secundaria.

Figura 4.3: Muestra el flujo secundario helicoidal generado en la vertical debido a la fuerza centrífuga.



Fuente: [www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org)

#### 4.5.1.3. La corrección del flujo secundario y la pendiente transversal del lecho debido a la gravedad

La carga total del lecho se puede descomponer en dos componentes x, y.

$$q_b = (qb_x, qb_y) = (q_b \cos(\alpha), q_b \sin(\alpha)) \quad (4.40)$$

Donde:  $q_b$  es la tasa de transporte por unidad de ancho, calculada en función de la carga de sedimento en equilibrio  $q_{b0}$  y  $\alpha$  el ángulo de dirección de la carga de fondo del lecho.

Para la carga de sedimentos en equilibrio se puede usualmente escribir como una función del parametro de Shields ( $\theta - \theta_c$ ) para un número de Reynolds de una partícula  $R_p$ :

$$q_{b0} = f(\theta - \theta_c; R_p) \quad (4.41)$$

Con esfuerzo cortante en el lecho  $\theta$  y el parámetro critico de Shields  $\theta_c$ . Por ejemplo, la forma adimensional de Meyer-Peter y Mueller, esta dada por:

$$q_{b0} = 8(\mu\theta - \theta_c)^{3/2} \quad (4.42)$$

Donde:  $\mu$  es el coeficiente de rizos.

#### 4.5.1.4. Dirección del transporte de sedimentos

El ángulo  $\alpha$  que se forma entre la linea de la dirección del transporte de sedimentos y la dirección del eje x, que es desviado desde el esfuerzo cortante es combinado por acción de la pendiente transversal y la corriente secundarias:

$$\tan\alpha = \frac{\sin\delta - \frac{1}{f(\theta)} \frac{\partial b}{\partial y}}{\cos\delta - \frac{1}{f(\theta)} \frac{\partial b}{\partial x}} \quad (4.43)$$

Los términos  $\frac{\partial b}{\partial x}$  y  $\frac{\partial b}{\partial y}$  representan las pendientes transversales y longitudinales respectivamente. La forma del sedimento es  $f(\theta)$  una función de ponderación que tiene en cuenta la influencia de la pendiente transversal del lecho, expresado como función del esfuerzo cortante adimensional o parámetro de Shields ( $\theta$ ) calculado como:

$$\theta = \frac{|\tau|}{(\rho_s - \rho)gD_{50}} \quad (4.44)$$

Algunas expresiones han sido propuestas en la literatura para  $f(\theta)$ , por ejemplo: Koch (1980)  $f(\theta) = \frac{3\theta}{2}$ ; Talmon et al.,  $f(\theta) = \beta_2\sqrt{\theta}$  con  $0,35 \leq \beta_2 \leq 1,5$ ; y Struiksma et al. (1985),  $f(\theta) = 9(\frac{D}{h})^{0,3}\sqrt{\theta}$ .

## 4.6. Pre-procesamiento con QGIS y Blue Kenue

El software Blue Kenue ha sido diseñado para generar la malla del dominio computacional y las condiciones de frontera del área de estudio de una manera interactiva.

Blue Kenue construye una malla no estructurada de elementos triangulares para discretizar el dominio. Estos elementos se utilizan para la solución de las ecuaciones hidrodinámicas gobernantes a través del método de elementos finitos. La construcción apropiada de la malla es de gran importancia porque permitirá entender las complejas interacciones entre la estructura y la estabilidad numérica. Los siguientes pasos fueron considerados durante la generación de malla:

- Definir el contorno del dominio computacional.
- Identificar si hay una isla dentro del dominio.
- Definir la densificación local de los nodos.

Estos criterios se pueden definir manualmente o de acuerdo a los elementos externos tales como velocidad, campos de concentración, etc. Blue Kenue genera dos archivos de salida esenciales: GEOMETRÍA (extensión. slf) y CONLIM (archivo de condición de frontera, de extensión. cli). Para construir estos archivos, se debe tener los siguientes datos:

- Batimetría en formato .xyz
- Dominio en formato i2s.
- Modelo digital de terreno (DEM).
- Malla con extensión .geo
- condiciones de frontera .cli

### 4.6.1. Características de la batimetría

La batimetría describe la elevación del lecho del río, a su vez ayuda a definir la distancia de los puntos para la densificación de los nodos. Los datos batimétricos se definen con respecto a un sistema de coordenadas de varias unidades (SI, CGS y Millas Náuticas). Estos datos deberían estar en el formato .xyz.

El formato .xyz fue adoptado en este estudio. Se generó usando el editor de texto gedit y MS EXCEL con tres columnas de datos para las coordenada x, coordenada y e coordenada z respectivamente.

### 4.6.2. Modelo digital del terreno (DEM)

El Modelo Digital de Terreno (DEM) es el primer intento de triangulación para generar la malla. El DEM comprende globalmente un mapa de densidad que proporciona un tamaño óptimo de elementos triangulares equiláteros para garantizar la distribución adecuada de la malla no estructurada.

La definición de los criterios de malla es una tarea importante en la construcción de la misma. El criterio indica la dimensión del lado de los elementos triangulares en el sistema internacional, es decir, metros m. Esto puede imponerse o definirse de muchas maneras. Este criterio constante global define los triángulos relativamente uniforme para todo el dominio. Para crear una malla es importante identificar que al incrementar el número de elementos y reducir el tamaño implica mayor calculo computacional. El refinamiento del mallado es un factor importante para determinar una solución exacta pero conlleva a mayor calculo computacional.

### 4.6.3. Características de la malla

Al generar la malla triangular no estructurada basada en los criterios definidos en el modelo digital de elevación. La información preliminar sobre la malla se inspecciona considerando los siguientes aspectos:

- La cantidad de nodos.

- La cantidad de islas o líneas geométricas.
- La cantidad de puntos fijos.
- Los valores batimétricos máximos y mínimos.
- La dimensión de los segmentos más grandes y más pequeños.
- Máxima distorsión de la celda.

Hacer una inspección preliminar de la calidad de la malla, usando el post-procesador Para-View y Blue Kenue, que muestra las siguientes características en la estructura de la malla:

- Batimetría.
- Longitud media de los segmentos en los triángulos (relacionados con las distancias entre nodos).
- Área de los triángulos.
- Distorsión de los triángulos.
- Ángulo más pequeño de los triángulos.

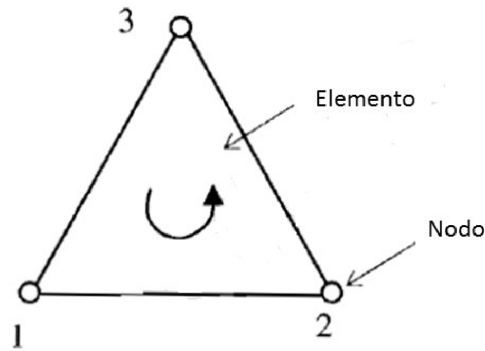
En general, se desea una distribución uniforme de los nodos con triángulos casi equiláteros de diferentes tamaños. Tal distribución es importante para la estabilidad numérica y para la reducción del tiempo computacional. La estructura de la malla puede editarse manualmente algunos nodos antes de la generación del archivo GEOMETRY (o archivo de malla de extensión. slf). Durante la modificación manual de la malla, se debe tener cuidado para evitar la introducción de errores en la malla, especialmente segmentos intersecados y triángulo over-constrained (fuera del rango de los criterios deseados). Cuando la malla cumple los criterios de especificación, el archivo de GEOMETRÍA que se genera es el formato SERAFIN (TELEMAT-2D, 2002). Este archivo de geometría es usado en el módulo hidrodinámico y de transporte de sedimentos del sistema open TELEMAT MASCARET durante la simulación.

#### 4.6.3.1. Malla bidimensional

La malla de TELEMAC-2D consiste en triángulos de tres nodos que se construye utilizando BIEF MESH, la subrutina FORTRAN del sistema open TELEMAC MASCARET. Cada elemento tiene numeración local y global en el archivo de geometría en las coordenadas  $x$  e  $y$ .

La función base para el análisis de elementos finitos TELEMAC-2D (2001); es obtenida para los elementos usando números locales y luego se usa una tabla de conectividad para transferir la numeración local a la numeración global para resolver todo el sistema lineal BIEF (2004). La figura (4.4) representa solo un elemento triangular con numeración local (orden ascendente en el sentido de las agujas del reloj).

Figura 4.4: Representación de un elemento triangular 2D y número de nodos.



*Fuente: (Hervouet, 2007)*

#### 4.6.4. Condiciones de frontera

El último paso en Blue Kenue implica definir las condiciones de contorno. El tipo de límite y los valores en los diversos nodos del dominio se definen de dos maneras: como una entidad y como un grupo. Una entidad se refiere a las características de las condiciones de frontera en un nodo individual, que comprenden el tipo y valor relacionado con las variables desconocidas (profundidad del agua, componentes de la velocidad). Hay seis tipos diferentes en Blue Kenue, para elegir y describir la naturaleza de la condición de frontera: adherencia, ola, deslizamiento, tasa de flujo y valores impuestos. Un grupo de nodos en una línea de contorno, siguen los siguientes pasos para crear el archivo de condición de frontera:



- Asignar a todos los nodos de la línea de contorno.
- Conectar para cada grupo de identidad.

En este estudio, las condiciones del archivo CONLIM del formato SERAFIN (TELEMAC-2D), fue creado con las condiciones de frontera definida para el acoplamiento del módulo hidrodinámico y transporte de sedimento.

#### 4.6.4.1. Condición de frontera solida

La condición de frontera sólida se modela como una pared lisa sólida que no produzca ninguna descarga a través del límite y que ejerce una fricción en la frontera. Cuando esta condición de frontera se aplica a los nodos, se genera automáticamente un coeficiente generado ( $a_c$ ) que es para garantizar el gradiente proporcional a la velocidad local como:

$$\frac{\partial u}{\partial e} = a_c u \quad \frac{\partial v}{\partial e} = a_c v \quad (4.45)$$

Donde  $e$  es la magnitud del vector perpendicular a la pared que se deriva para un perfil de velocidad logarítmica.

#### 4.6.4.2. Condición de frontera liquida

El flujo y la profundidad del agua están controlados aguas arriba y aguas abajo, respectivamente. La condición de frontera aguas arriba se simula como un límite abierto con un índice de flujo prescrito, mientras que aguas abajo se simula con un límite abierto con una profundidad prescrita.

En este caso TELEMAC-2D requiere un perfil de velocidad para inicializar el cálculo de los componentes de velocidad. El perfil de velocidad se define normal al límite superior y su norma es aproximada a un valor proporcional de la raíz cuadrada de la profundidad del agua desde el fondo. Aguas abajo, se mantiene un nivel constante de la superficie libre durante la simulación.

Una introducción repentina de una descarga puede causar inestabilidad computacional (TELEMAC-2D), por lo tanto, la descarga se incrementa progresivamente. Se debe crear un archivo de condición de frontera líquida (hidrograma).

## 4.7. Técnicas numéricas usadas por el sistema Open TELEMAT MASCARET

Hay una gran cantidad de técnicas numéricas implementadas en el sistema open TELEMAT MASACARET. Estas técnicas se utilizan para obtener la solución numérica de ecuaciones diferenciales. En esta sección se describirá brevemente las técnicas numéricas más utilizadas, como: el esquema numérico y algoritmos numéricos.

### 4.7.1. Esquemas numéricos

El sistema open TELEMAT MASCARET, tiene diferentes esquemas numéricos o técnicas de solución de las ecuaciones del flujo de fluido con la precisión deseada. Los detalles de aquellos se pueden encontrar en TELEMAT-3D (1998), TELEMAT-2D (2001), TELEMAT-2D (2002), SISYPHE (2004) y BIEF (2004). En TELEMAT-2D, los esquemas numéricos comunes son:

- Esquema semi-implícito centrado + SUPG.
- Esquema conservador + SUPG.
- esquema de PSI

Se pueden elegir diferentes esquemas para diferentes variables (como: velocidad, profundidad, tracer,  $k - \epsilon$ ) durante las simulaciones.

El esquema conservador + SUPG (Streamline Upwind Petrov Galerkin) es válido solo para la advección de la profundidad. La advección del modelo  $k - \epsilon$  solo se puede resolverse con el método de las características. TELEMAT-2D (2002) sugiere usar el método de las características para resolver todas las variables. Dependiendo del esquema utilizado, la conservación de masa se puede mejorar usando las llamadas sub-iteraciones dentro del mismo tiempo de paso. Cabe señalar que el tiempo de discretización se llama semi-implícito TELEMAT-2D (2001). Esto implica que el tiempo relacionado con los parámetros de ponderación, como:  $\theta_h$  y  $\theta_u$  no deben ser menores que 0.5.

### 4.7.2. Algoritmo de solución

Los conceptos fundamentales de los algoritmos de solución son similares en TELEMAC-2D y SISYPHE. Los algoritmos de solución dependen de la consideración de los esquemas numéricos. Si se elige el método de las características, las ecuaciones son tratadas en dos pasos usando el método de pasos fraccionados:

- **Primer paso:** Los términos de advección corresponden al transporte de las variables físicas  $h, u, v$  y  $w$ . En la alternativa  $k - \epsilon$  son tratadas teniendo en cuenta el carácter hiperbólico de las ecuaciones.
- **Segundo paso:** las ecuaciones restantes, es decir: propagación, difusión, términos fuente y los términos de advección cuando no hay un recurso para el método de las características. Esta etapa se resuelve mediante la discretización del tiempo por el método de elementos finitos que permite la eliminación de la no linealidad de las ecuaciones. La discretización del espacio transforma las ecuaciones continuas en un sistema discreto lineal donde los valores de  $h, u, v$  y  $w$  en los nodos son las variables desconocidas. El sistema es resuelto por el método de gradiente conjugado o GMRES.

En el método de paso fraccionado, con espacio-tiempo discretizado, las incógnitas se encuentran en múltiplos del tiempo de paso  $t$  tal que  $t^n = t^0 + nt$ . La derivada con respecto al tiempo de una función está discretizada como:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f^{n+1} - f^n}{\Delta t} \quad (4.46)$$

Donde:  $f$  representa las variables no conocidas  $h, u, v, w, k$  o  $\epsilon$ . Empieza desde la solución inicial  $f^0$  en el tiempo  $t^0$ . La solución es obtenida por sucesivas iteraciones (tiempos de paso) por encontrar el primer  $f^1$  y  $f^2$ . Sin el tiempo de paso, este método consiste de encontrar  $f^{n+1}$ , empieza desde  $f^n$  y pasa a un paso intermedio para las variables  $h, u, v, w, k$  y  $\epsilon$  tal como sigue:

$$\frac{\bar{f} - f^n}{\Delta t} + \text{termino de advección} = 0 \quad (4.47)$$

$$\frac{f^{n+1} - \bar{f}}{\Delta t} + \text{otros terminos} = 0 \quad (4.48)$$

Donde  $\bar{f}$  es el valor intermedio de  $f$  con el mismo tiempo paso, durante la advección. La aproximación en el tiempo será de orden uno porque ciertos términos de advección no están

discretizados a  $t^n + \Delta t/2$ .

Cuando no se considera el método de las características, se resuelve el conjunto completo de ecuaciones para los términos propagación, difusión y fuente. Esto es realizado por:

- Discretización en el tiempo.
- Discretización en el espacio.

Hablando en general, la "discretización en el tiempo", llamada semi-implícito. No puede ser estrictamente aplicado. Esto se debe a que el análisis de Fourier del método semi-implícito no tiene en cuenta la no linealidad o las condiciones de contorno. Por lo tanto, se proporciona un margen de seguridad en el sistema TELEMAT expresado por una función  $f$  como:  $f = \theta_t f^{n+1} + (1 - \theta_t) f_n$ . Con  $\theta_t > 0,5$  permaneciendo siempre cerca de este valor mínimo 0.5 hasta 1.

La "discretización en el espacio", las funciones  $f$  se evaluarán solo en los puntos de discretización (en nodos de la malla) descomponiéndolos en las funciones base como (TELEMAT-2D 2001):

$$f = \sum_{i=1}^n f_i \psi_i \quad (4.49)$$

Donde  $n$  es la cantidad de puntos discretos,  $f_i$  es el valor de la función  $f$  en el punto  $i$  y  $\psi_i$ , es la función asociada con ese punto. Cada una de estas funciones básicas está asociada a un grado de libertad. Esta función es evaluada en 1 en este punto y en 0 en todos los demás puntos.

Las funciones de interpolación están dentro de un elemento de referencia, que tiene el elemento del dominio correspondiente vinculado por transformación iso-paramétrica. Los elementos de referencia son triángulos de tres nodos en TELEMAT-2D o SISYPHE. Las funciones base de estos elementos están determinadas usando la transformación iso-paramétrica con interpolaciones lineales. Esto es porque la transformación iso-paramétrica en triángulos con interpolación lineal puede invertirse fácilmente.

---

## 4.8. Post-Procesamiento

Para el post-procesamiento se usó el software:

- Blue Kenue.
- ParaVIEW.
- Tecplot.

Para el análisis de los resultados y la calibración del modelo.

---

## Capítulo V

# Aplicación de TELEMAC-2D y SISYPHE en el modelo hidráulico del Río Madre de Dios - Tramo la Pastora

### **Resumen:**

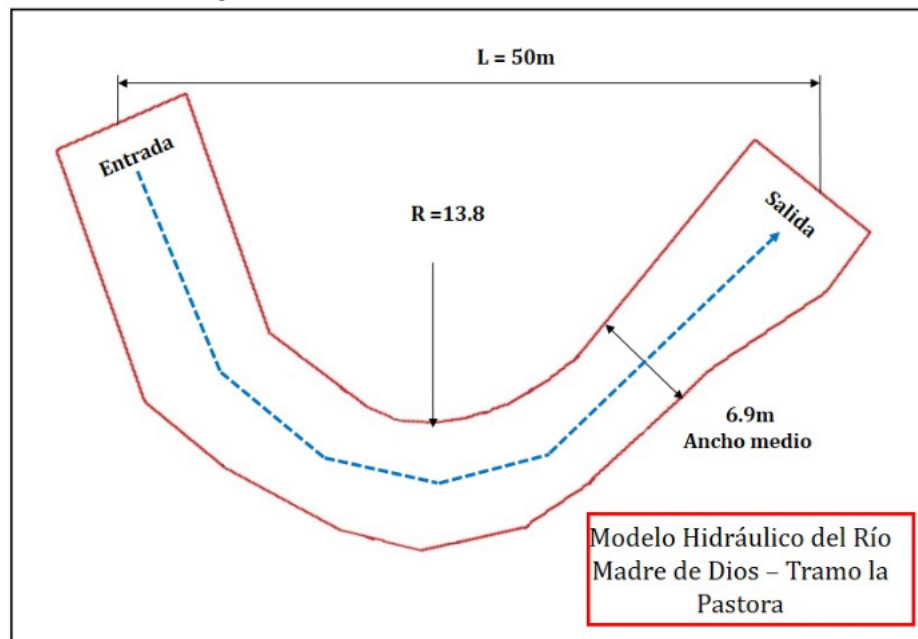
*En este capítulo se describe los pasos que se realizaron para la configuración del modelo hidráulico como: generar la malla, las condiciones de borde, generar archivos de entrada para el modelo computacional y pasos que se realizó para el acoplamiento del módulo hidrodinámico (TELEMAC-2D) y transporte de sedimentos morfodinámico (SISYPHE).*

### 5.1. Delimitación del dominio

El dominio se discretizó matemáticamente para formar la malla computacional, es una malla no estructurada adecuada para el código de elementos finitos que tiene implementado el sistema Open TELEMAC MASCARET que esta formado por triángulos con nodos en cada vértice donde las ecuaciones son resueltas durante la simulación para calcular las variables hidrodinámicas como la velocidad  $(u,v,w)$ , presión, etc.

Las características del dominio físico utilizado en esta investigación se muestran en la siguiente Figura (5.1):

Figura 5.1: Dimensiones del dominio físico.



*Fuente: Elaboración propia*

### 5.1.1. Generación de la malla

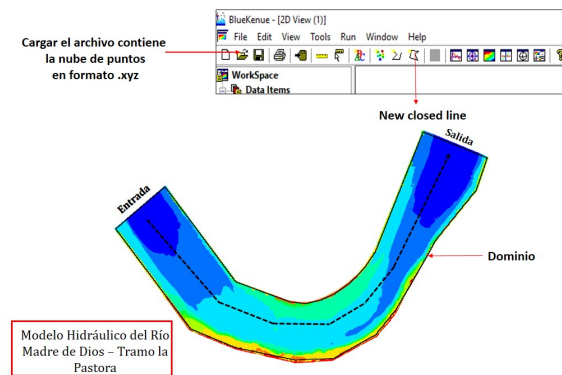
Para discretizar la zona de estudio, se usó el software Blue Kenue que permite generar la malla triangular. En el caso del modelo hidráulico del río Madre de Dios se construyó una malla no estructurada de  $0.3\text{ m}$  que tiene extensión .slf. Además es uno de los tres archivos necesarios para realizar la simulación.

Blue Kenue es una herramienta que es ampliamente usado para generar el mallado. Además permite gener otro archivo de extensión .cli, donde se define las condiciones de frontera.

Pasos para generar la malla en Blue Kenue:

- Para generar la malla se cargo 1239922 puntos que tiene la extensión .xyz, abrir el programa Blue Kenue, click en Open y seleccionar el archivo que tiene formato .xyz.

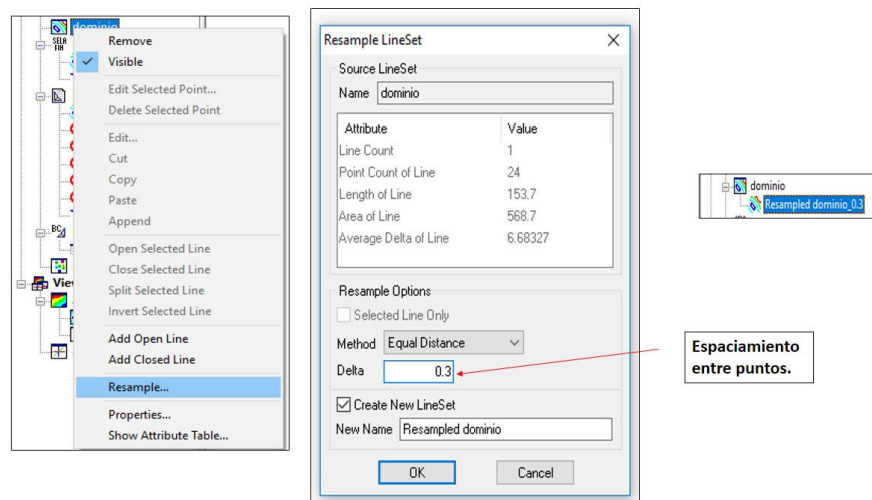
Figura 5.2: Un total de 1239922 puntos visualizado en el programa Klue Kenue.



**Fuente:** Elaboración propia

- b) Hacer click en CloseLine, dibujar el contorno del dominio. Luego hacer clic derecho y seleccionar la opción resample para definir la distancia entre puntos a largo de todo el dominio, en este caso es 0.3m.

Figura 5.3: Se realizó el resample (mismo distanciamiento entre nodos) del dominio



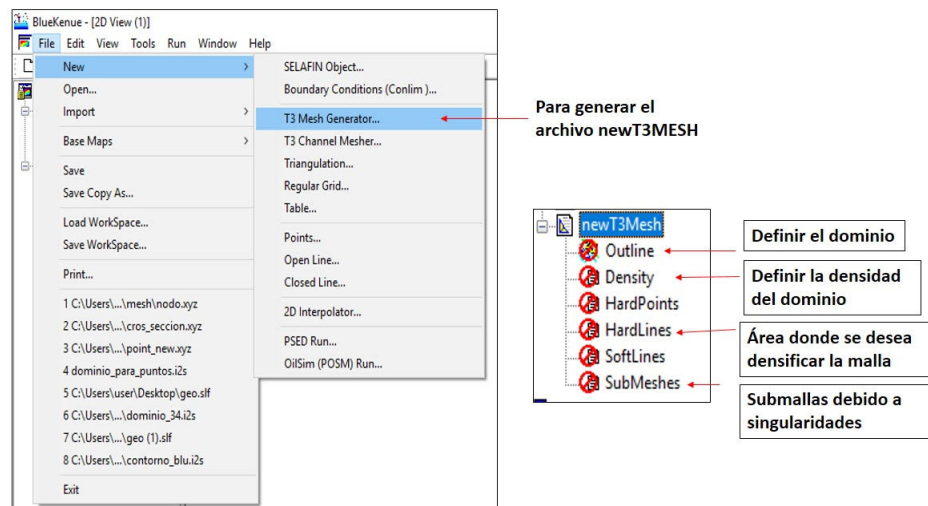
**Fuente:** Elaboración propia

- c) Seleccionar New → T3 Mesh Generator. En la siguiente ventana definir las propiedades de la malla, donde se tendrá que cambiar el valor de (Default Edge Length) el cual sirve para definir la separación entre nodos. Aquí se definió la separación de 0.3 m. Click en ok.



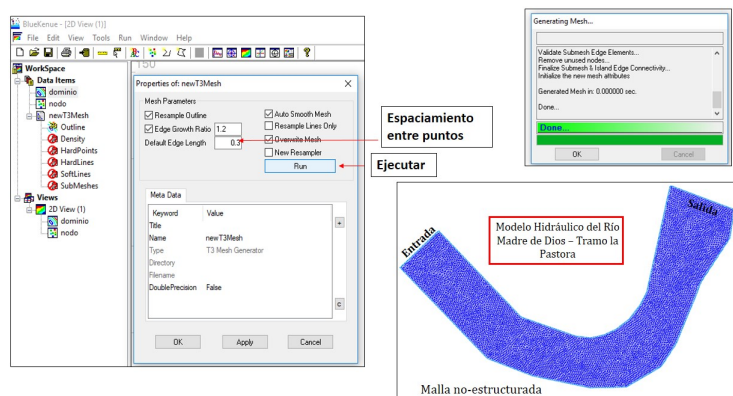
d) Luego seleccionar File → New → ok.

Figura 5.4: Seleccionar la opción de T3 Mesh Generator



*Fuente: Elaboración propia*

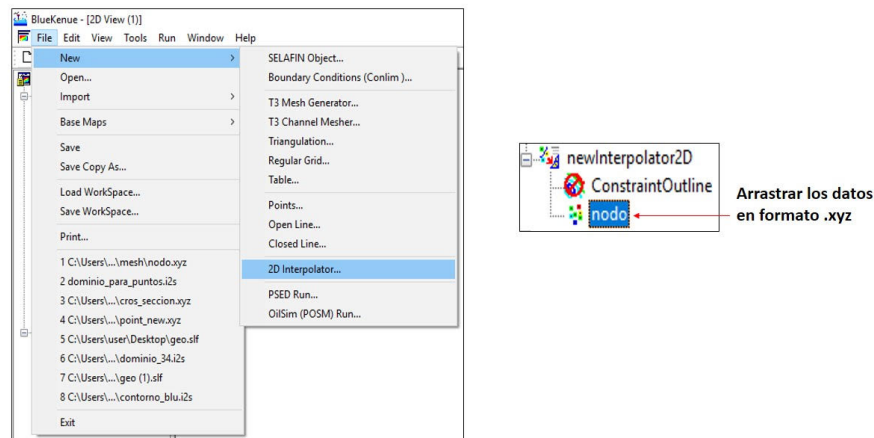
Figura 5.5: Se selecciono la distancia entre nodos que es de 0.3 m



*Fuente: Elaboración propia*

e) Arrastrar el archivo de puntos el cual contiene la elevación y el Resample Dominio a newInterpolator2D.

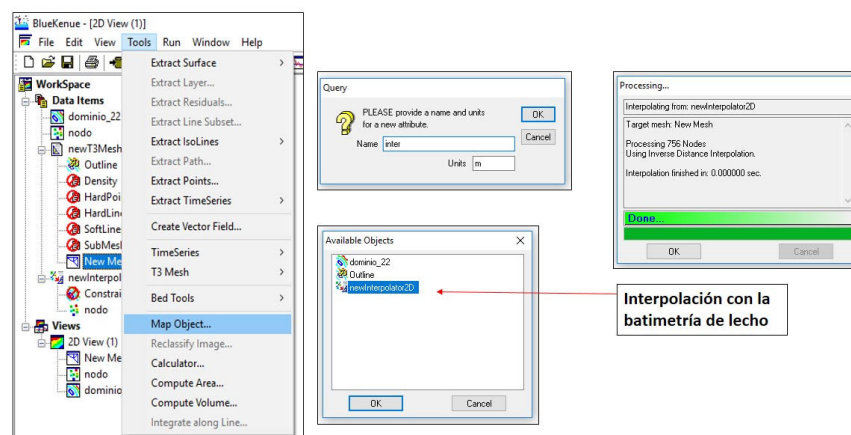
Figura 5.6: Opción interpolacion (2D Interpolator)



**Fuente:** Elaboración propia

- f) Seleccionar New Mesh luego ir a la opción Tools → MapObject → newInterpolator2D → ok. Luego se realizó la interpolación para que cada punto tenga valores en la coordenada Z.

Figura 5.7: Asignarle elevación a la malla generada por medio de (Map Object)



**Fuente:** Elaboración propia

### 5.1.2. Generación de los archivos de entrada de TELEMAT-2D

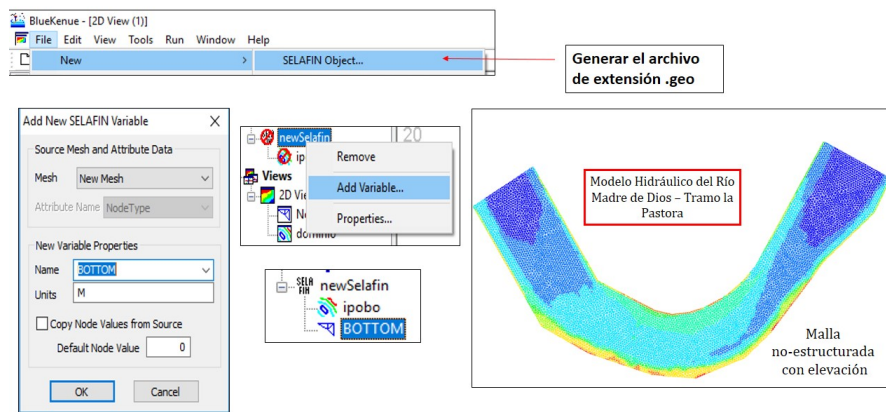
En Blue Kenue se puede generar dos archivos de entrada para realizar la simulación numérica.

- El archivo de geometría que tiene la extensión .slf.
- El archivo de condiciones de frontera que tiene una extensión .cli

#### 5.1.2.1. Generación del archivo de geometría .slf

- Hacer click en File → New → SELAFIN. Para crear un objeto nuevo, newSelafin, se genera un Data Items.
- Seleccionar la opción BOTTOM, que es el que reconoce open TELEMAT MASCARET como batimetría del relieve de la superficie.
- Arrastrar la malla generada que tiene el nombre de BOTTOM a newSelafin.
- Luego seleccionar newSelafin para guardar con el nombre geo que tiene la extensión .slf

Figura 5.8: Archivo SELAFIN Object.

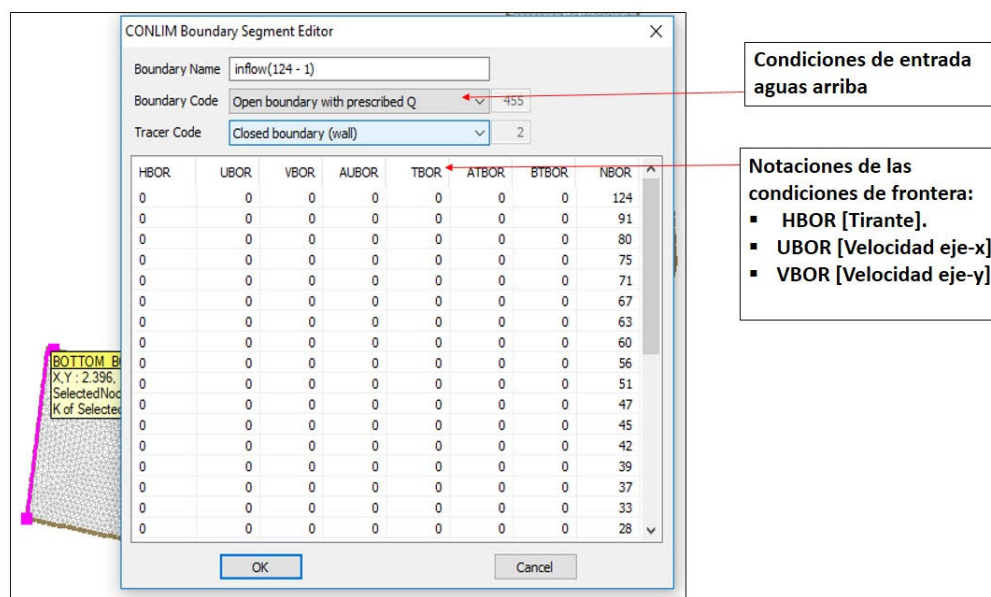


**Fuente:** Elaboración propia

### 5.1.2.2. Generación del archivo de condiciones de borde .cli

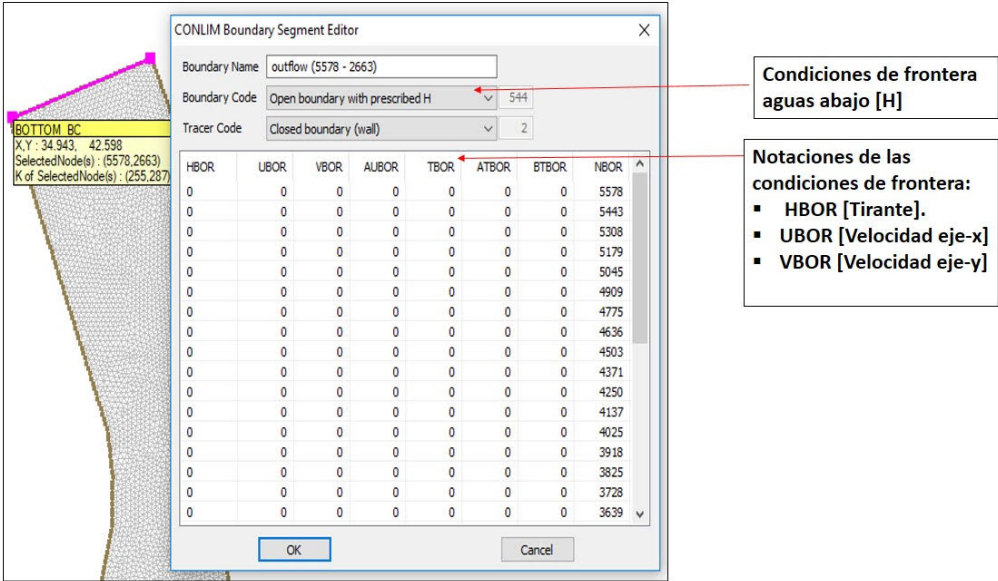
- Seleccionar File → Boundary Conditions (Colims), luego elegir la opción BOTTOM.
- Luego arrastrar la opción BOTTOM a la vista 2D, para definir la condición de frontera aguas arriba y abajo.
- Hacer doble clic en el nodo y presionar shift para seleccionar la condición de frontera aguas arriba donde se definió (Open boundary with prescribed Q) y aguas abajo (Open boundary with prescribed H)
- Guardar el archivo como river.cli

Figura 5.9: Archivo Boundary Conditions (Conlim) aguas arriba.



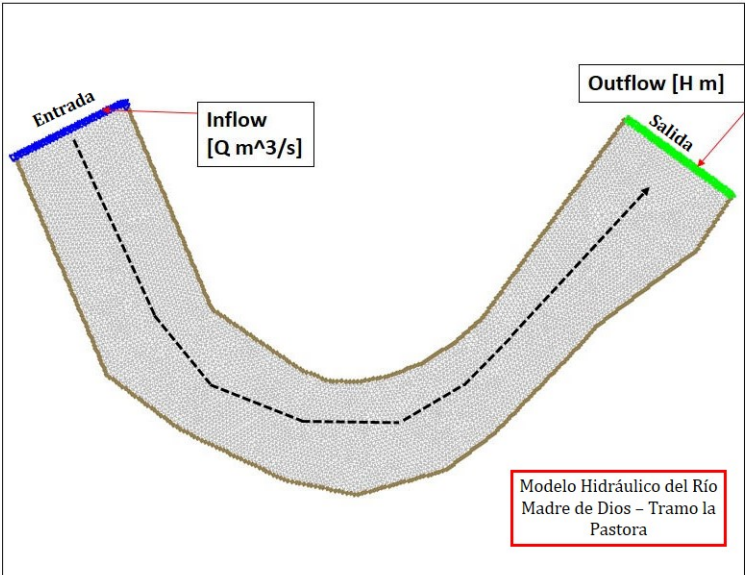
*Fuente: Elaboración propia*

Figura 5.10: Archivo Boundary Conditions (Conlim) aguas abajo.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.11: Condiciones de frontera (Boundary Conditions) inflow  $Q [m^3/s]$  y outflow  $H [m]$



Fuente: Elaboración propia

### 5.1.3. Archivos necesarios para ejecutar TELEMAT-2D

Para realizar la simulación numérica con TELEMAT-2D es necesario tener tres archivos:

- Archivo de geometría de extensión .slf
- Archivo de condiciones de borde. cli
- Archivo de extensión .cas

El archivo de extensión .cas se puede descargar de la página web ([www.opentelemat.org](http://www.opentelemat.org)) del programa, este archivo permite la ejecución que contiene todos los parámetros como: esquema numérico, modelo de turbulencia. Este archivo se puede editar con un editor de texto como Geany, gedit o kate) donde se coloca el nombre de los archivos de geometría, condición de borde y el nombre del archivo de salida de extensión .slf.

#### 5.1.3.1. Descripción de los parámetros del archivo .cas

##### a) Equations, boundary conditions

- VELOCITY PROFILES: La opción 4:4 describe que el vector velocidad es normal al límite y su norma es proporcional a la raíz cuadrada de la profundidad del agua. Esta opción es válida solo para la tasa de flujo prescrito
- PRESCRIBED FLOWRATES: Esto se utiliza para fijar el valor de la tasa de flujo de una frontera abierta con caudal prescrito.
- PRESCRIBED ELEVATIONS: Esta opción se utiliza para definir la elevación de una frontera abierta con la profundidad prescrita.

##### b) Initial conditions

- INITIAL DEPTH: Profundidad inicial.
- INITIAL CONDITIONS: es una condición donde se puede iniciar el modelo con una misma profundidad de agua.

##### c) Input-output files

---

- BOUNDARY CONDITIONS FILE: Colocar el nombre del archivo generado en el software BlueKenue donde se especificó las condiciones de frontera de extensión .cli
- RESULTS FILE: Colocar el nombre del archivo de salida de extensión .slf
- GEOMETRY FILE: Colocar el nombre del archivo geometría de extensión .slf

*d)* **Secondary currentes**

En un canal curvo el flujo experimenta una aceleración radial y la fuerza centrífuga actúa en proporción a la velocidad media. A su vez, el nivel de agua está inclinada radialmente en el banco exterior para producir una súper elevación suficiente para crear una gradiente de presión que permite equilibrar la fuerza centrífuga. A profundidades más superficiales la fuerza centrífuga excede la fuerza de presión por lo que la fuerza resultante impulsa el fluido hacia afuera. TELEMAT-2D permite tener en cuenta el efecto de estas corrientes secundarias con los siguientes parámetros.

- SECONDARY CURRENTS: activar este parámetro con la palabra YES.
- PRODUCTION COEFFICIENT FOR SECONDARY CURRENTS: El término de producción en la ecuación de advección-difusión depende linealmente de este coeficiente que se puede calibrar.
- DISSIPATION COEFFICIENT FOR SECONDARY CURRENTS: EL término de disipación se puede modificar variando este coeficiente

*e)* **Graphics and listing**

- VARIABLES FOR GRAPHICS PRINTOUTS: Esto se utiliza para especificar la lista de variables para las que todos los valores se impriman en cada punto de la malla y serán almacenados en el archivo de resultados.

*f)* **Numerical parameters**

- TIME STEP: Define el tiempo que separa dos instantes de cálculo.
  - GRAPHIC PRINTOUT PERIOD: Corrige el período para las salidas con el fin de tener un archivo excesivamente grande.
  - LISTING PRINTOUT PERIOD: Esto soluciona el período entre ediciones de time steps. El valor dado es dado en número de time steps.
-

Figura 5.12: Descripción del archivo .cas de TELEMAT2D.

```
TURBULENCE MODEL                      = 3
SOLVER FOR K-EPSILON MODEL            = 7
MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR K AND EPSILON = 500
OPTION FOR THE SOLVER FOR K-EPSILON MODEL = 4
VELOCITY DIFFUSIVITY                   = 1.E-6
LAW OF BOTTOM FRICTION                  = 4
FRICTION COEFFICIENT                   = 0.020

/-----
/ EQUATIONS, BOUNDARY CONDITIONS
/-----
VELOCITY PROFILES                      = 4; 4
PRESCRIBED FLOWRATES                   = 0; 0.546
PRESCRIBED ELEVATIONS                  = -0.986; 0

/-----
/ EQUATIONS, INITIAL CONDITIONS
/-----

INITIAL DEPTH                          = 0.01
INITIAL CONDITIONS = 'CONSTANT DEPTH'
/-----
/ INPUT-OUTPUT, FILES
/-----

BOUNDARY CONDITIONS FILE = river2.cli
RESULTS FILE             = t2d_seccurrents.slf
/FORTRAN FILE            = princi.f
GEOMETRY FILE            = geo2.slf
PREVIOUS COMPUTATION FILE = 'hort_start.slf'
INITIAL TIME SET TO ZERO = YES
CONTINUITY CORRECTION    = YES
```

---



Figura 5.13: Uso de los coeficientes de flujo secundario y esquema numérico

```

/-----SECCURRENTS-----
SECONDARY CURRENTS = YES
PRODUCTION COEFFICIENT FOR SECONDARY CURRENTS = 7.071
DISSIPATION COEFFICIENT FOR SECONDARY CURRENTS = 0.5
/-----
COUPLING WITH                               = 'SISYPHE'
SISYPHE STEERING FILE                       = pastora_sisyphe.cas
COUPLING PERIOD FOR SISYPHE                 = 1

/-----
/ INPUT-OUTPUT, GRAPHICS AND LISTING
/-----
MASS-BALANCE                               = YES
VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS =
'U,V,H,B,US,S,M,K,E,F,L,OMEGA,TAU_S,1/R'

/-----
/ NUMERICAL PARAMETERS
/-----
SOLVER ACCURACY                            = 1.E-6
SOLVER                                      = 1
TIME STEP = 0.08
GRAPHIC PRINTOUT PERIOD = 7200
LISTING PRINTOUT PERIOD = 7200
DURATION                                  = 86400
TREATMENT OF THE LINEAR SYSTEM : 2 SOLVER : 1

```

*Fuente:* [www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org)

#### 5.1.4. Ejecución de TELEMAT-2D

. Para ejecutar TELEMAT-2D de debe tener los siguientes archivos:

- Crear una carpeta, en donde contiene los archivos de extensión: geo.slf, river.cli y pastora.cas.
- Ejecutar en la terminal el siguiente comando: telemat2d.py pastora.cas
- Se obtiene como output el archivo de resultados de extensión. slf que es utilizado como un *hort - start* que es usado para inicializar todas las variables y hacer la simulación por 24 horas.

### 5.1.5. Configuración del módulo SISYPHE

En cada paso de tiempo, el modelo de transporte de sedimentos incorpora dos pasos. Primero, se realiza la simulación del módulo hidrodinámico (TELEMAT-2D) para obtener el archivo de inicialización de las variables hidrodinámicas, llamado (hort-start). En segundo lugar se realiza la simulación de forma acoplada de TELEMAT-2D y SISYPHE para calcular la tasa de transporte apartir de las variables hidrodinámicas en cada iteración en la conocida ecuación de continuidad de transporte de sedimentos (ecuación de Exner). Para hacer la simulación numérica de transporte de sedimentos con el módulo SISYPHE es necesario contar con los siguientes archivos:

- Archivo de geometría .slf
- Archivo de condiciones de frontera. cli
- Archivos de iniciación de variables *hort* – *start*.
- Archivo de extensión .cas donde especifica los parámetros del módulo hidrodinámico.
- Archivo de extensión .cas que contiene los parámetros de transporte de sedimentos como: diámetro del sedimento, formula de transporte de sedimentos, nombre del archivo de salida.

Figura 5.14: Archivo de extensión .cas para el módulo morfodinámico.

```

/-----
/ SISYPHE bedload
/-----
/-----
/ FILES
/-----
/
/ --- GEOMETRY -----
GEOMETRY FILE           = geo2.slf
BOUNDARY CONDITIONS FILE = river2.cli
/
/ --- RESULTS ---
RESULTS FILE             = pastora_sisyphe.slf
/
/-----
/ GENERAL INFORMATIONS - OUTPUTS
/-----
/
TITLE                   = 'River_pastora_sisyphe'
VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS = 'U,V,S,H,B,Q,M,E,QSBL,TOB,MU'

```

*Fuente:* [www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org)

Figura 5.15: Características físicas de la partícula de sedimento.

```

/-----
/  PHYSICAL PARAMETERS
/-----
/
BED LOAD                                = YES
BED-LOAD TRANSPORT FORMULA              = 1 / MPM
SEDIMENT DIAMETERS                      = 0.000400
SKIN FRICTION CORRECTION                 = 1
/ CASE 1
SLOPE EFFECT                            = YES
FORMULA FOR DEVIATION                    = 1 / K&F direction
FORMULA FOR SLOPE EFFECT                 = 1 / K&F intensity

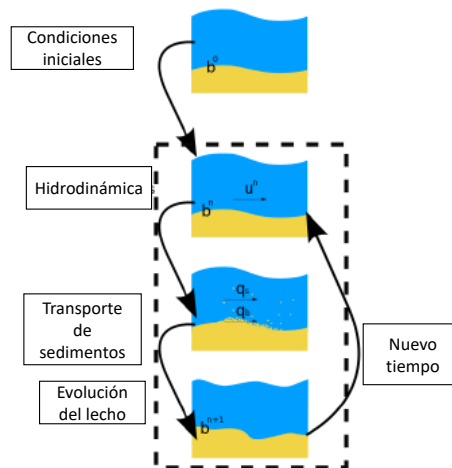
BETA                                    = 1.3 / K&F intensity coef
SECONDARY CURRENTS                      = YES
SECONDARY CURRENTS ALPHA COEFFICIENT     = 0.75
/-----
/  TIDAL FLATS
/-----
/
TIDAL FLATS = YES
OPTION FOR THE TREATMENT OF TIDAL FLATS = 1
/
/-----
/  NUMERICAL PARAMETERS
/-----
/
MASS-BALANCE = YES
SOLVER ACCURACY                                = 1.E-12
MASS-LUMPING = YES
ZERO = 1e-12
TETA = 0.5
MINIMAL VALUE OF THE WATER HEIGHT = 0.

```

*Fuente:* [www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org)

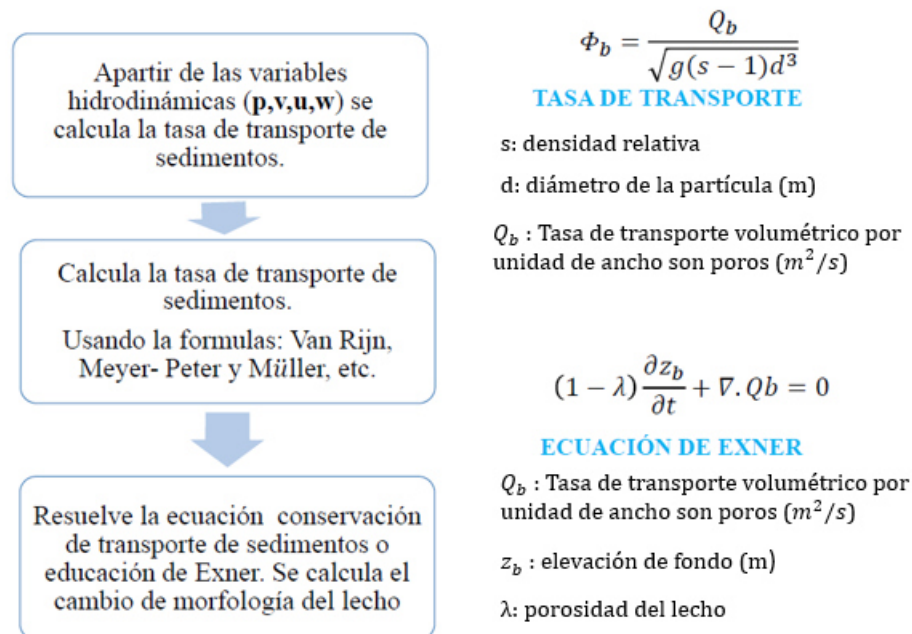
Figura 5.16: Acoplamiento del módulo hidrodinámico (TELEMAC-2D) y transporte de sedimentos (SISYPHE).

ACOPLAMIENTO DEL MODULO HIDRODINAMICO (TELEMAC-2D) Y MORFODINAMICO (SISYPHE)



Fuente: [www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org)

Figura 5.17: Algoritmo de solución para el módulo de transporte de sedimentos



Fuente:Elaboración propia

# Capítulo VI

## Análisis de resultados de la simulación numérica

### **Resumen:**

*En este capítulo se realiza la validación del modelo numérico con los datos obtenidos en el ensayo experimental del modelo hidráulico. Se compara la velocidad que se obtuvo en la simulación con los datos recolectados en el ensayo experimental. Finalmente se compara el cambio de la morfología del lecho antes y después de la experiencia. Se hace un análisis de los resultados del modelo numérico tales como: interpretar los efectos del flujo helicoidal, configuración del proceso de sedimentación y erosión.*

### 6.1. Calibración del módulo hidrodinámico

Los resultados numéricos son analizados en siete secciones transversales (Figura 3.5). Primero se validó el módulo hidrodinámico TELEMAC-2D donde se usó la corrección de flujo secundario que tiene implantado el módulo hidrodinámico (Figura 5.12). Se utiliza esta corrección debido a que en los canales curvos el flujo experimenta una aceleración radial y una fuerza centrífuga que actúa en proporción a la velocidad media.

### 6.1.1. Comparación del resultado numérico y experimental de las velocidades

Se tiene la velocidad media en siete secciones transversales y en cada sección se tiene datos de velocidad en seis puntos, medidos de la margen izquierda hacia la margen derecha, cuadro (3.10).

Los resultados del modelo numérico tuvieron que ser interpolados en las coordenadas en donde fueron medidos los datos de velocidad en el modelo hidráulico.

La Tabla 6.1 muestra los datos de velocidad en seis puntos que fueron medidos desde la margen derecha hacia la margen izquierda.

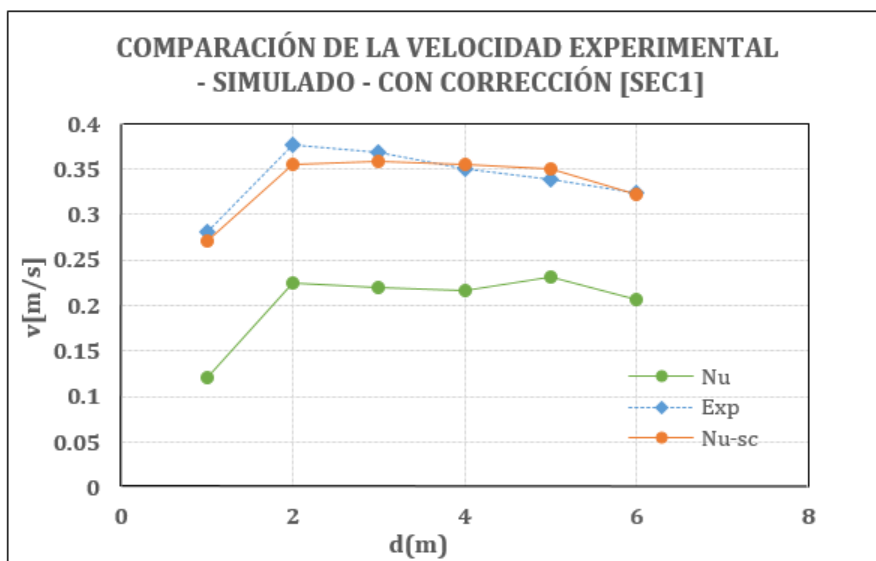
- (Exp) es la velocidad experimental.
- (Nu-sc) es la velocidad experimental usando la corrección de flujo secundario.
- (Nu) es la velocidad numérica sin usar la opción de corrección de flujo secundario.
- (Error Exp-Nu-sc) es el porcentaje de error entre los datos de la velocidad experimental y numérica considerando la corrección de flujo secundario.
- (Error Exp-Nu) es el porcentaje de error entre los datos experimentales y numéricos sin considerar la corrección de flujo secundario.

Tabla 6.1: Datos de la velocidad en la sección 1 [sec1]

Velocidad en el plano x-y					
Puntos	Exp [m/s]	Nu-sc [m/s]	Nu [m/s]	Error Exp Nu-sc	Error Exp Nu
1	0.281	0.271	0.12	3.6	57.3
2	0.376	0.355	0.225	5.6	40.2
3	0.368	0.358	0.22	2.7	40.2
4	0.35	0.355	0.217	1.4	38.0
5	0.339	0.351	0.232	3.5	31.6
6	0.324	0.323	0.206	0.3	36.4

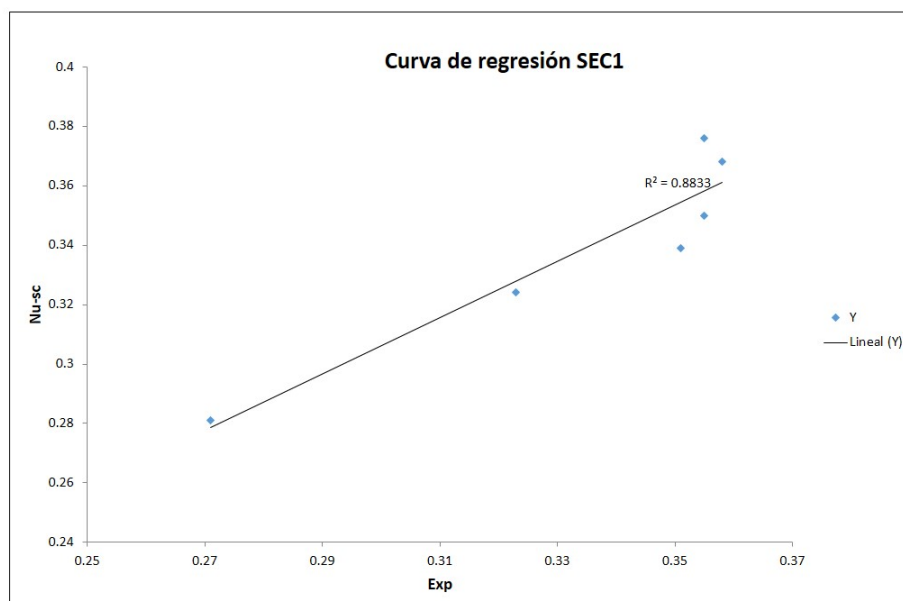
**Fuente:** Proyecto N<sup>o</sup> 358-PNCP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

Figura 6.1: Perfil de velocidad en el plano x-y, se muestra que al considerar la corrección de flujo secundario se aproxima a los datos experimentales.



*Fuente: Elaboración propia*

Figura 6.2: Coeficiente de correlación entre los datos obtenidos de la simulación numérica y datos experimentales



*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 6.2: Parámetros Estadísticos.

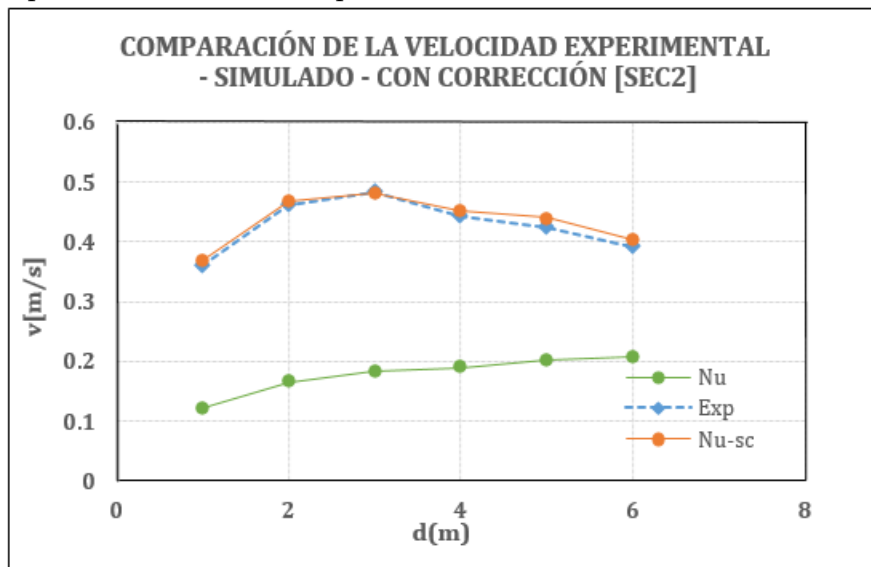
Parámetros Estadísticos.	Valores
Coefficiente de correlación múltiple	0.939
Coefficiente de determinación $R^2$	0.883
$R^2$ ajustado	0.854

Tabla 6.3: Datos de la velocidad en la sección 2 [sec2]

Velocidad en el plano x-y					
Puntos	Exp [m/s]	Nu-sc [m/s]	Nu [m/s]	Error Exp Nu-sc	Error Exp Nu
1	0.359	0.368	0.121	2.5	66.3
2	0.462	0.468	0.165	1.3	64.3
3	0.483	0.482	0.183	0.2	62.1
4	0.444	0.451	0.19	1.6	57.2
5	0.423	0.44	0.202	4.0	52.2
6	0.391	0.404	0.209	3.3	46.5

**Fuente:** Proyecto N° 358-PNCP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

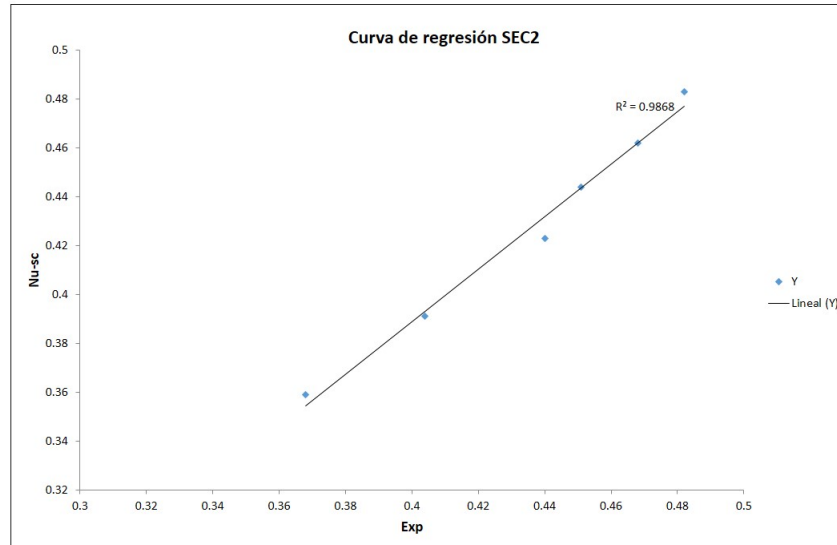
Figura 6.3: Perfil de velocidad en el plano x-y, se muestra al considerar la corrección de flujo secundario se aproxima a los datos experimentales.



**Fuente:** Elaboración propia



Figura 6.4: Coeficiente de correlación entre los datos obtenidos de la simulación numérica y datos experimentales.



*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 6.4: Parámetros Estadísticos.

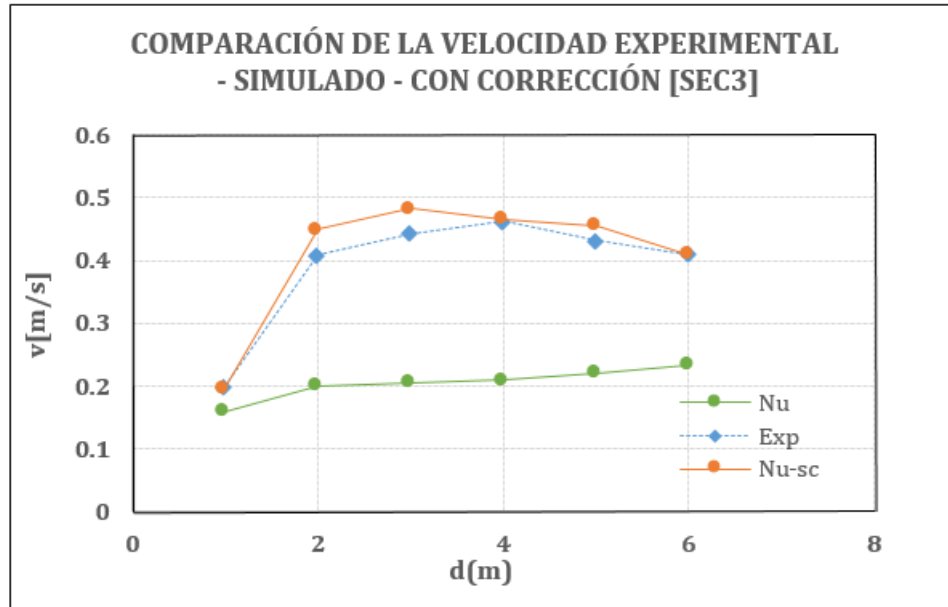
Parámetros Estadísticos.	Valores
Coeficiente de correlación múltiple	0.993
Coeficiente de determinación $R^2$	0.986
$R^2$ ajustado	0.983

Tabla 6.5: Datos de la velocidad en la sección 3 [sec3]

Velocidad en el plano x-y					
Puntos	Exp [m/s]	Nu-sc [m/s]	Nu [m/s]	Error Exp Nu-sc	Error Exp Nu
1	0.2	0.196	0.159	2.0	20.5
2	0.408	0.449	0.201	10.0	50.7
3	0.443	0.483	0.204	9.0	54.0
4	0.462	0.466	0.209	0.9	54.8
5	0.432	0.455	0.22	5.3	49.1
6	0.409	0.41	0.234	0.2	42.8

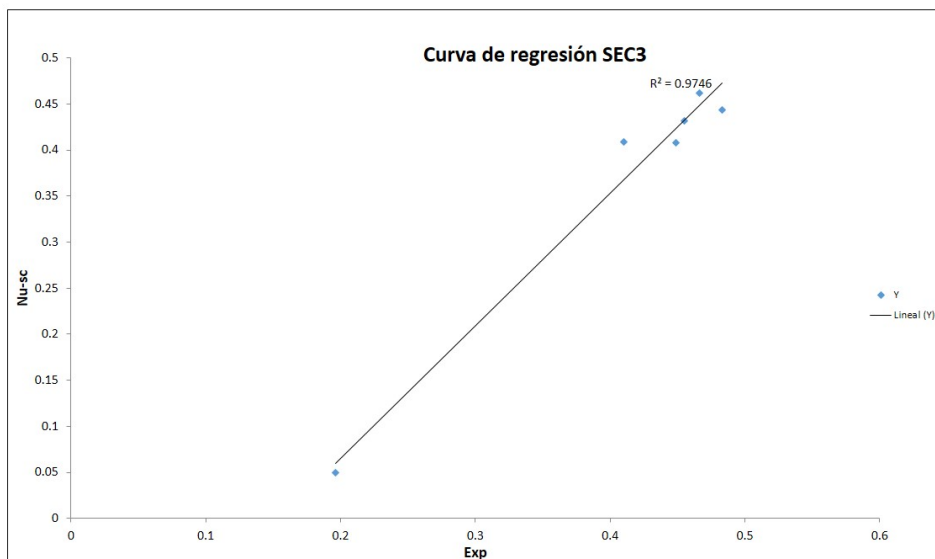
*Fuente: Proyecto N° 358-PNCP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.*

Figura 6.5: Perfil de velocidad en el plano x-y, se muestra al considerar la corrección de flujo secundario se aproxima a los datos experimentales.



**Fuente:** Elaboración propia

Figura 6.6: Coeficiente de correlación entre los datos obtenidos de la simulación numérica y datos experimentales.



**Fuente:** Elaboración propia

Tabla 6.6: Parámetros Estadísticos.

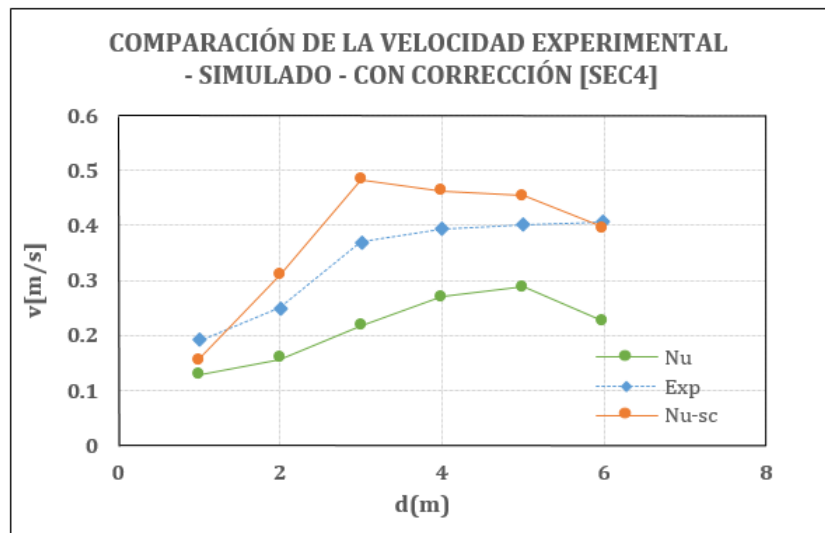
Parámetros Estadísticos.	Valores
Coefficiente de correlación múltiple	0.987
Coefficiente de determinación $R^2$	0.974
$R^2$ ajustado	0.968

Tabla 6.7: Datos de la velocidad en la sección 4 [sec4]

Velocidad en el plano x-y					
Puntos	Exp [m/s]	Nu-sc [m/s]	Nu [m/s]	Error Exp Nu-sc	Error Exp Nu
1	0.19	0.155	0.127	18.4	33.2
2	0.25	0.308	0.157	23.2	37.2
3	0.369	0.483	0.218	30.9	40.9
4	0.394	0.462	0.27	17.3	31.5
5	0.402	0.454	0.288	12.9	28.4
6	0.406	0.395	0.226	2.7	44.3

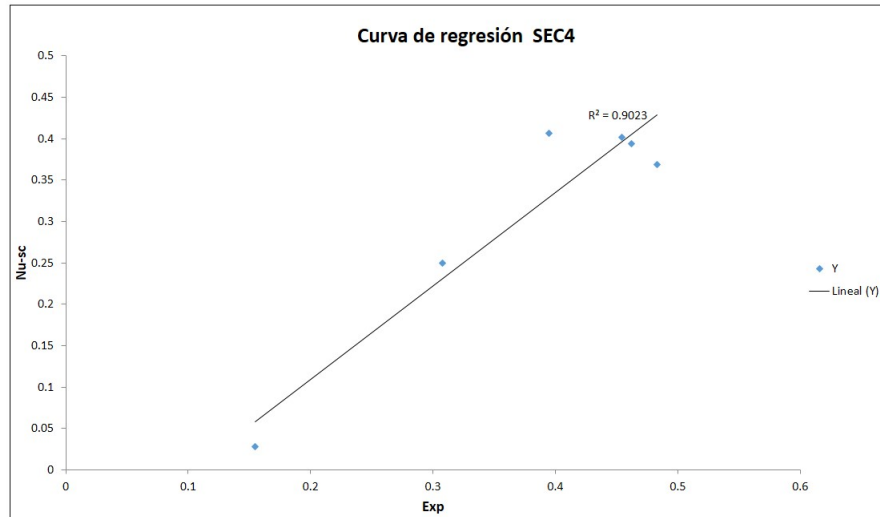
**Fuente:** Proyecto N<sup>o</sup> 358-PNCP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

Figura 6.7: Perfil de velocidad en el plano x-y, se muestra al considerar la corrección de flujo secundario se aproxima a los datos experimentales.



**Fuente:** Elaboración propia

Figura 6.8: Coeficiente de correlación entre los datos obtenidos de la simulación numérica y datos experimentales.



*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 6.8: Parámetros Estadísticos.

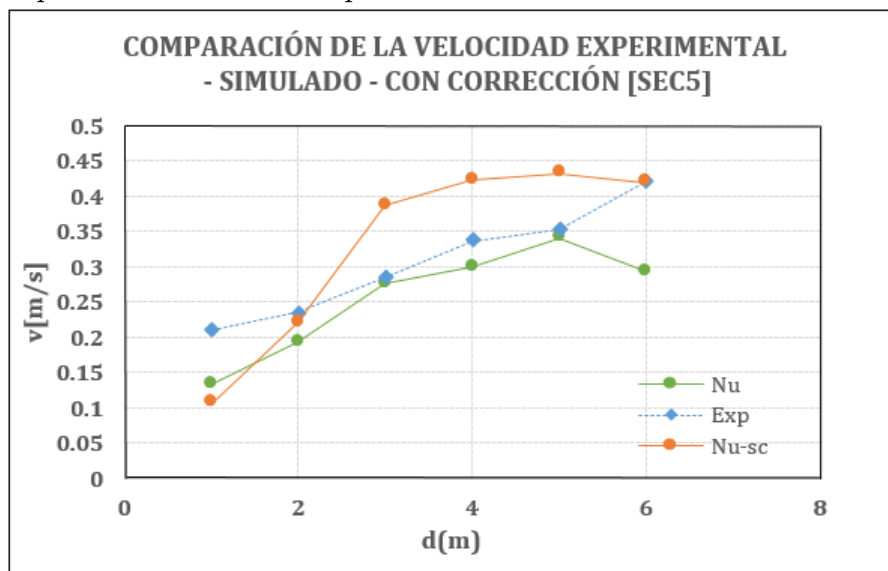
Parámetros Estadísticos.	Valores
Coeficiente de correlación múltiple	0.949
Coeficiente de determinación $R^2$	0.902
$R^2$ ajustado	0.877

Tabla 6.9: Datos de la velocidad en la sección 5 [sec5]

Velocidad en el plano x-y					
Puntos	Exp [m/s]	Nu-sc [m/s]	Nu [m/s]	Error Exp Nu-sc	Error Exp Nu
1	0.21	0.107	0.134	49.0	36.2
2	0.235	0.221	0.193	6.0	17.9
3	0.285	0.387	0.276	35.8	3.2
4	0.336	0.423	0.299	25.9	11.0
5	0.352	0.432	0.341	22.7	3.1
6	0.42	0.419	0.293	0.2	30.2

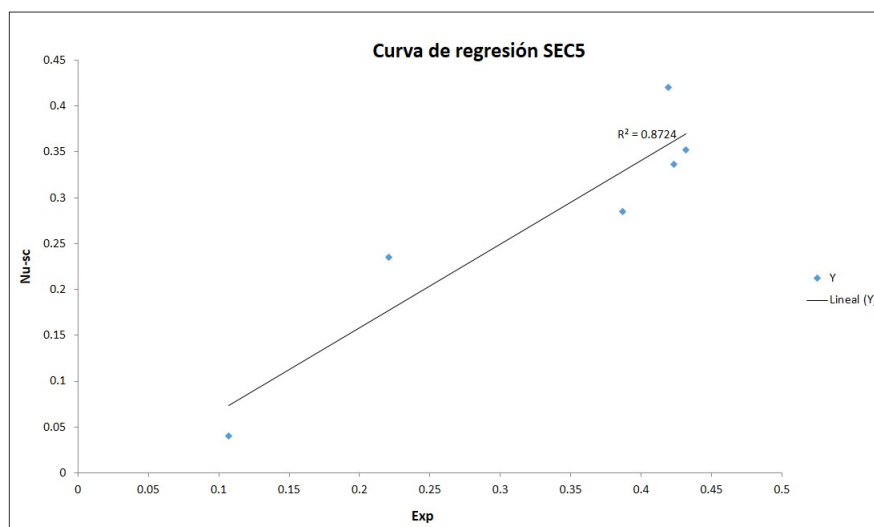
*Fuente: Proyecto N° 358-PNCP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.*

Figura 6.9: Perfil de velocidad en el plano x-y, se muestra al considerar la corrección de flujo secundario se aproxima a los datos experimentales.



*Fuente: Elaboración propia*

Figura 6.10: Coeficiente de correlación entre los datos obtenidos de la simulación numérica y datos experimentales



*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 6.10: Parámetros Estadísticos.

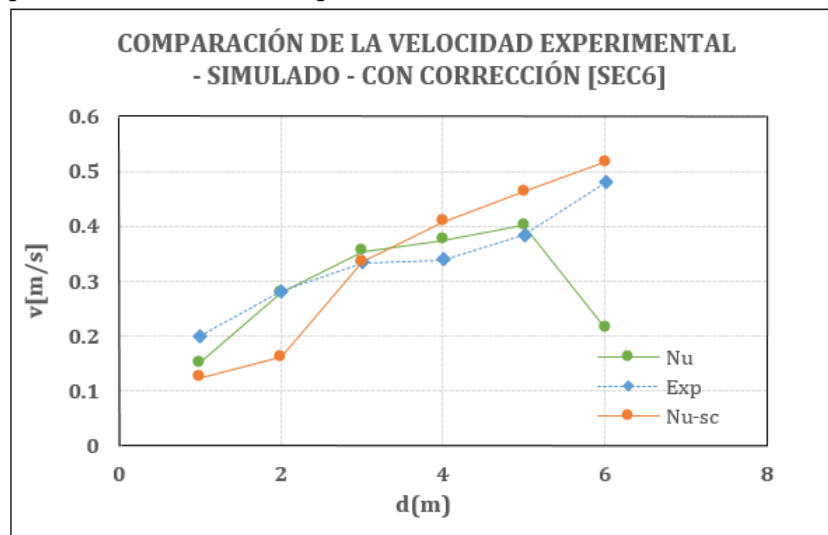
Parametros Estadísticos	Valores
Coefficiente de correlación múltiple	0.934
Coefficiente de determinación $R^2$	0.872
$R^2$ ajustado	0.840

Tabla 6.11: Datos de la velocidad en la sección 6 [sec6]

Velocidad en el plano x-y					
Puntos	Exp [m/s]	Nu-sc [m/s]	Nu [m/s]	Error Exp Nu-sc	Error Exp Nu
1	0.201	0.123	0.152	38.8	24.4
2	0.282	0.162	0.278	42.6	1.4
3	0.334	0.335	0.353	0.3	-5.7
4	0.339	0.407	0.374	20.1	-10.3
5	0.383	0.463	0.402	20.9	-5.0
6	0.479	0.518	0.215	8.1	55.1

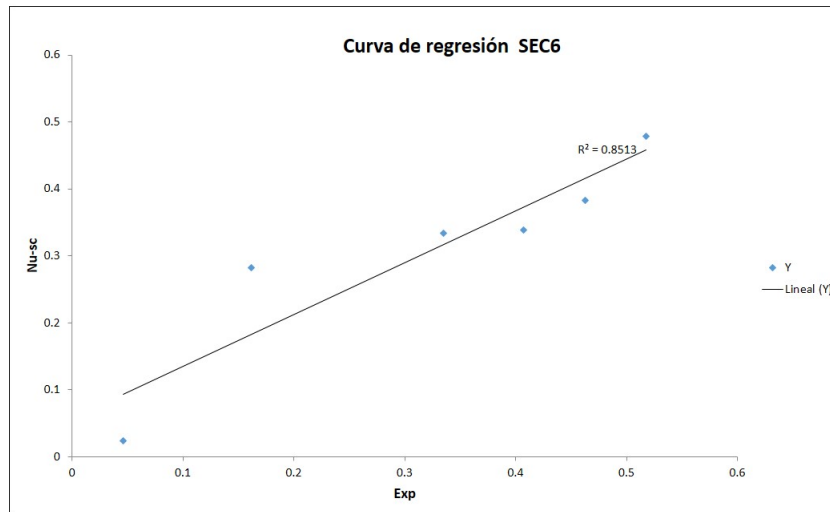
**Fuente:** Proyecto N<sup>o</sup> 358-PNCP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.

Figura 6.11: Perfil de velocidad en el plano x-y, se muestra al considerar la corrección de flujo secundario se aproxima a los datos experimentales.



**Fuente:** Elaboración propia

Figura 6.12: Coeficiente de correlación entre los datos obtenidos de la simulación numérica y datos experimentales.



*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 6.12: Parámetros Estadísticos.

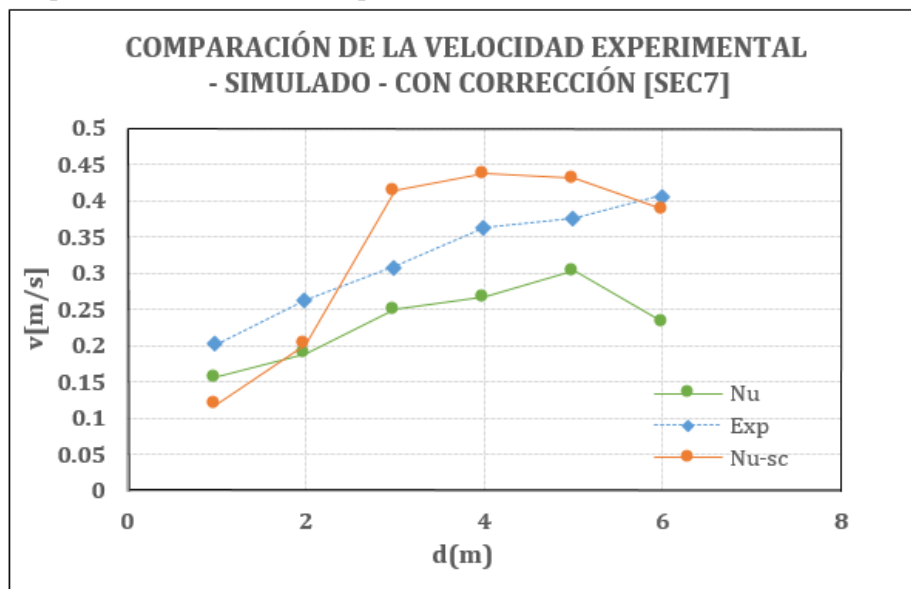
Parámetros Estadísticos.	Valores
Coeficiente de correlación múltiple	0.922
Coeficiente de determinación $R^2$	0.851
$R^2$ ajustado	0.814

Tabla 6.13: Datos de la velocidad en la sección 7 [sec7]

Velocidad en el plano x-y					
Puntos	Exp [m/s]	Nu-sc [m/s]	Nu [m/s]	Error Exp Nu-sc	Error Exp Nu
1	0.202	0.119	0.156	41.1	22.8
2	0.263	0.202	0.189	23.2	28.1
3	0.309	0.413	0.25	33.7	19.1
4	0.362	0.437	0.268	20.7	26.0
5	0.376	0.432	0.303	14.9	19.4
6	0.407	0.388	0.233	4.7	42.8

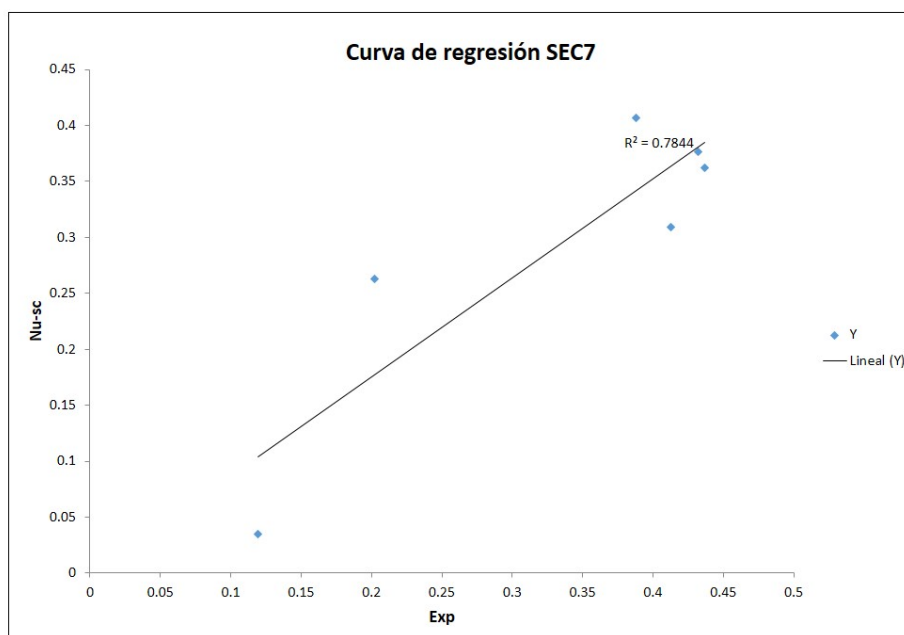
*Fuente: Proyecto N° 358-PNCP-PIAP-2014, auspiciado por INNOVATE.*

Figura 6.13: Perfil de velocidad en el plano x-y, se muestra al considerar la corrección de flujo secundario se aproxima a los datos experimentales.



*Fuente: Elaboración propia*

Figura 6.14: Coeficiente de correlación entre los datos obtenidos de la simulación numérica y datos experimentales.



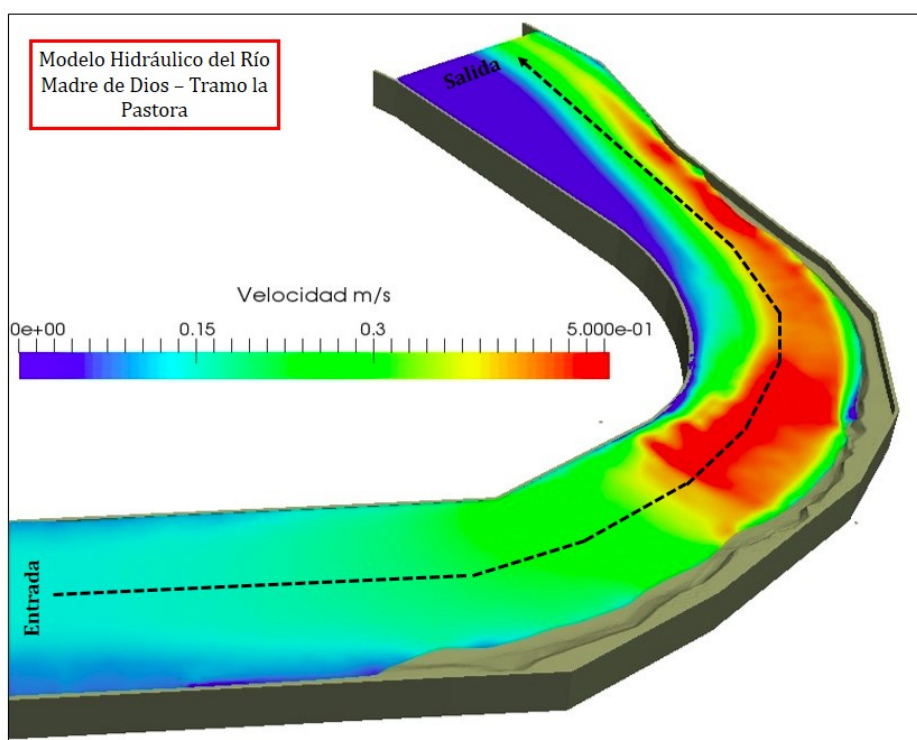
*Fuente: Elaboración propia*



Tabla 6.14: Parámetros Estadísticos.

Parámetros Estadísticos	Valores
Coefficiente de correlación múltiple	0.885
Coefficiente de determinación $R^2$	0.784
$R^2$ ajustado	0.730

Figura 6.15: Se muestra las velocidades máximas en el tramo curvo, donde la velocidad está en el rango de 0-0.5m/s



**Fuente:** *Elaboración propia*

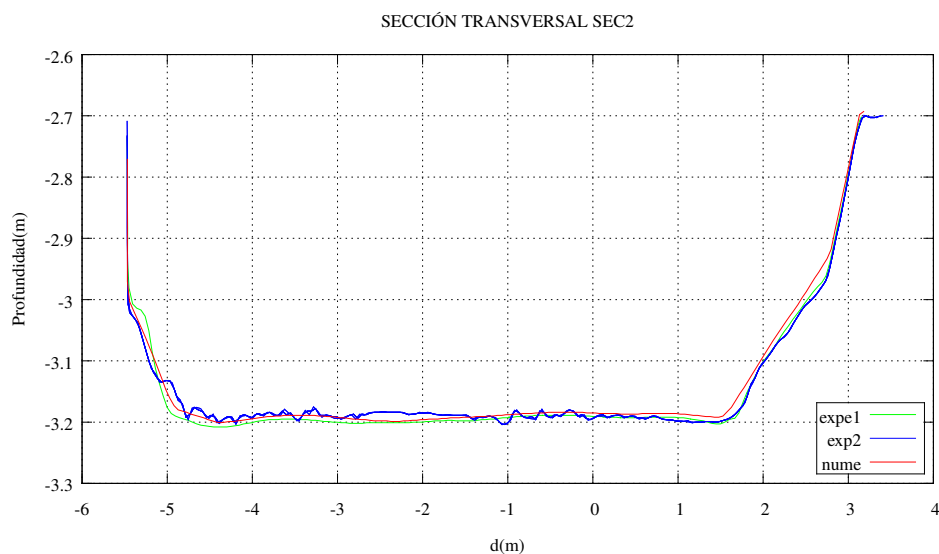
## 6.2. Calibración del módulo morfodinámico

Del acoplamiento del módulo hidrodinámico y transporte de sedimentos (TELEMAC-2D y SISYPHE), se consideró la corrección de flujo secundario, el efecto de la pendiente del lecho y la formula de transporte de sedimentos (Meyer-Peter y Müller) para tener una mejor aproximación a los resultados como la tasa de transporte de sedimentos, evolución del lecho. Por medio de la ecuación de continuidad de transporte de sedimentos (Ecuación de Exner). Al considerar esos parámetros se muestra una marcada erosión en el banco exterior y sedimentación en el banco interior.

Se tiene cuatro secciones transversales Figura (3.5), donde se compara con la batimetría antes y después del experimento en el modelo hidráulico del río Madre de Dios y con los resultados obtenidos del modelo numérico. Se observa el cambio de la morfología del lecho debido al efecto de la pendiente del lecho y a la ocurrencia del flujo secundario en el tramo curvo.

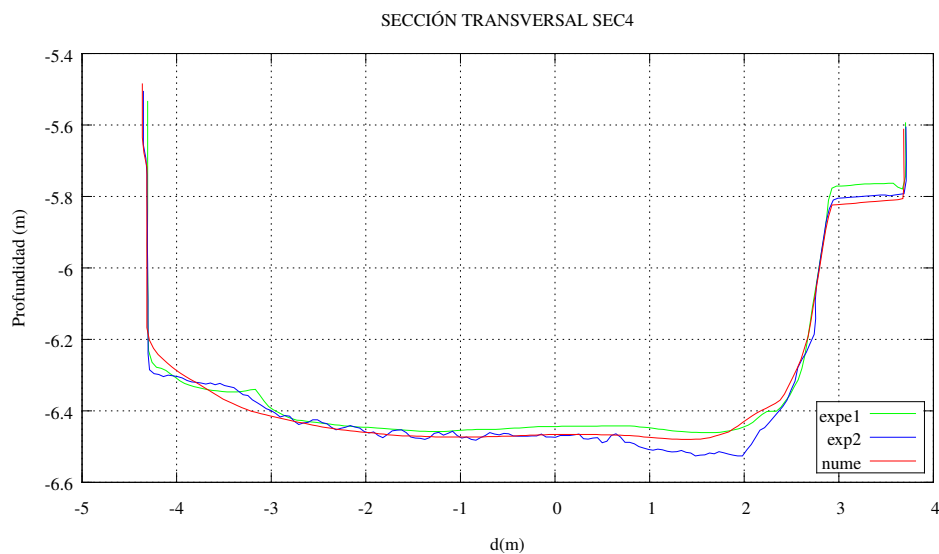
- (expe1) es la batimetría del lecho antes del ensayo experimental.
- (exp2) es la batimetría del lecho después del ensayo experimental en modelo hidráulico.
- (nume) resultado numérico obtenido por el acoplamiento del módulo (TELEMAC-2D y SISYPHE).

Figura 6.16: Comparación de secciones transversales con la batimetría antes y después del experimento y el resultado del modelo numérico. (Sección S2)



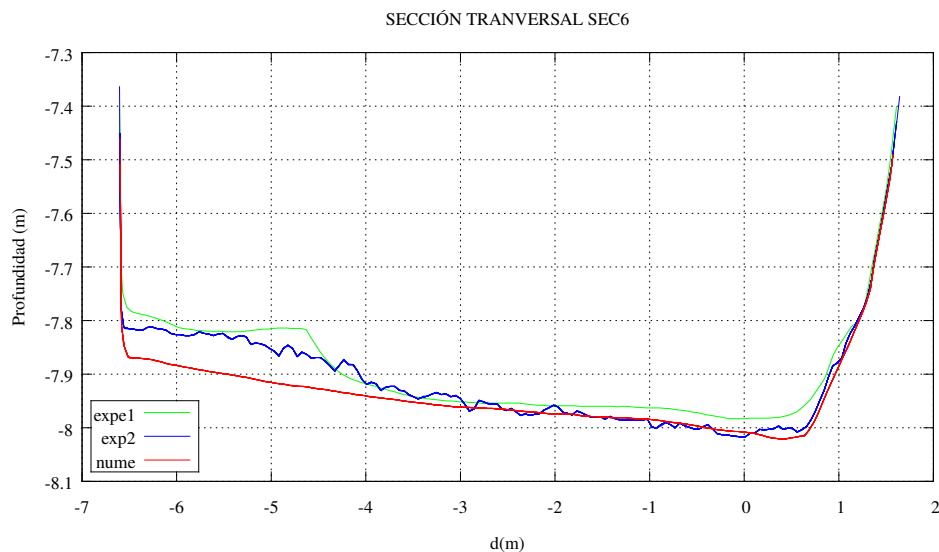
*Fuente: Elaboración propia*

Figura 6.17: Comparación de secciones transversales con la batimetría antes y después del experimento y el resultado del modelo numérico. (Sección S4)



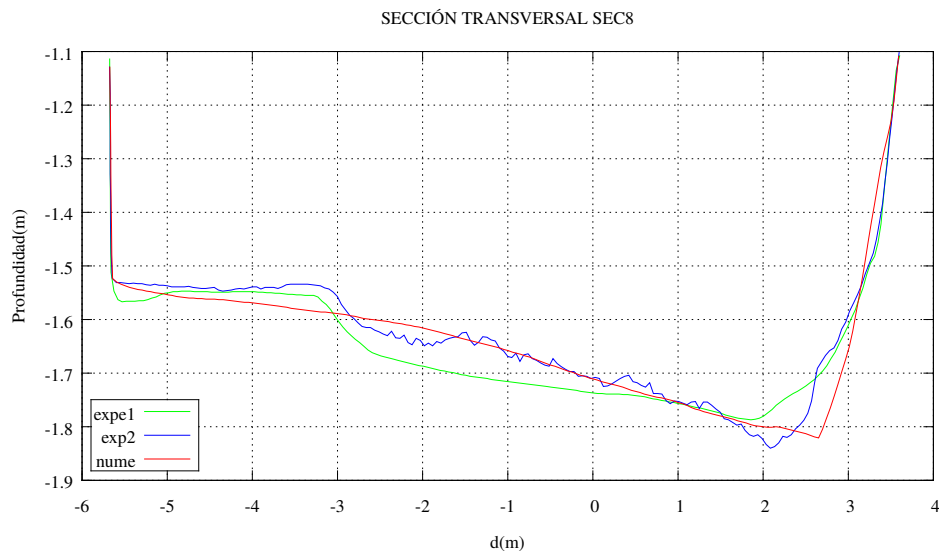
*Fuente: Elaboración propia*

Figura 6.18: Comparación de secciones transversales con la batimetría antes y después del experimento y el resultado del modelo numérico. (Sección S6)



*Fuente: Elaboración propia*

Figura 6.19: Comparación de secciones transversales con la batimetría antes y después del experimento y el resultado del modelo numérico. (Sección S8)



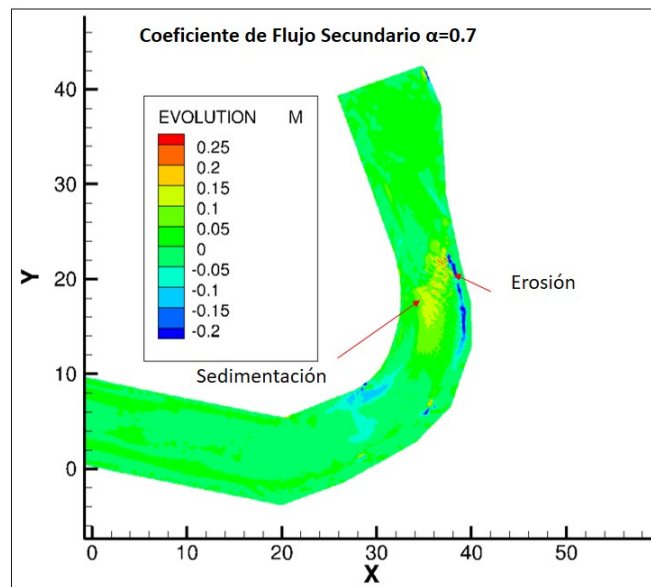
*Fuente: Elaboración propia*

### 6.3. Análisis de sensibilidad del parámetro de flujo secundario

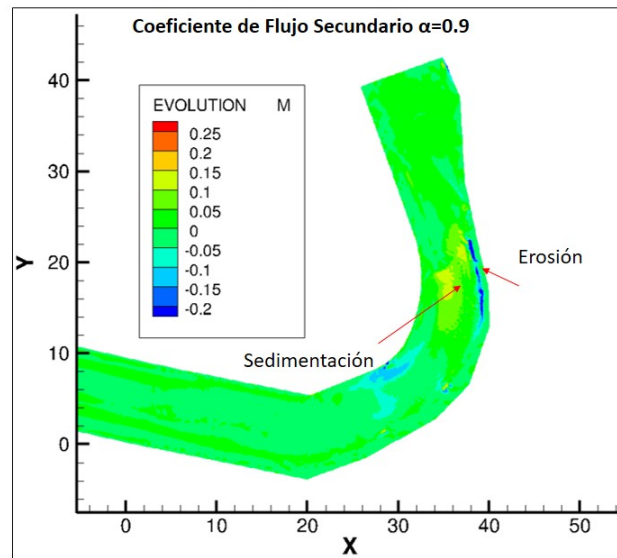
Se realizó la simulación bidimensional del modelo hidráulico del río Madre de Dios, debido a que un modelo bidimensional de profundidad promediada no puede representar la velocidad en la vertical en tramos curvos porque se genera un movimiento helicoidal que es altamente tridimensional, para ello se usó la opción de corrección de flujo secundario en el módulo de transporte de sedimentos, SECONDARY CURRENTS ALPHA COEFFICIENT  $\alpha = 0,7$ .

Además un análisis de sensibilidad para el parámetro *alpha* para valores de 0.7, 0.9, 1.2. El valor que representa mejor el proceso de erosión y sedimentación es el valor de SECONDARY CURRENTS ALPHA COEFFICIENT  $\alpha = 0,7$ .

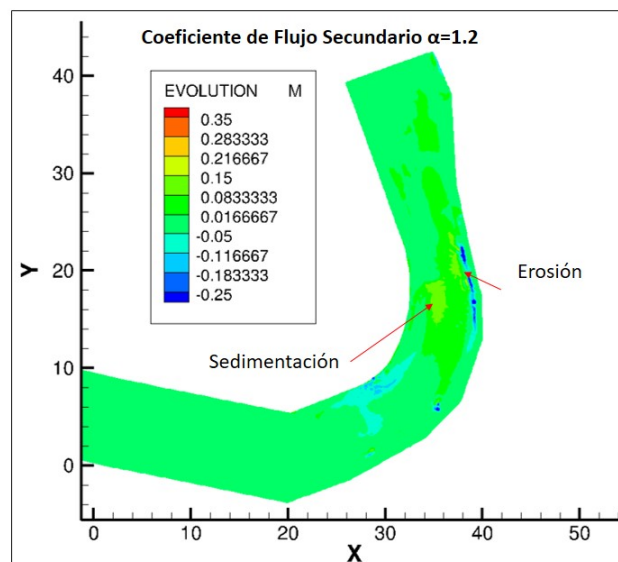
Figura 6.20: Coeficiente de flujo secundario  $\alpha=0.7$



*Fuente:Elaboración propia.*

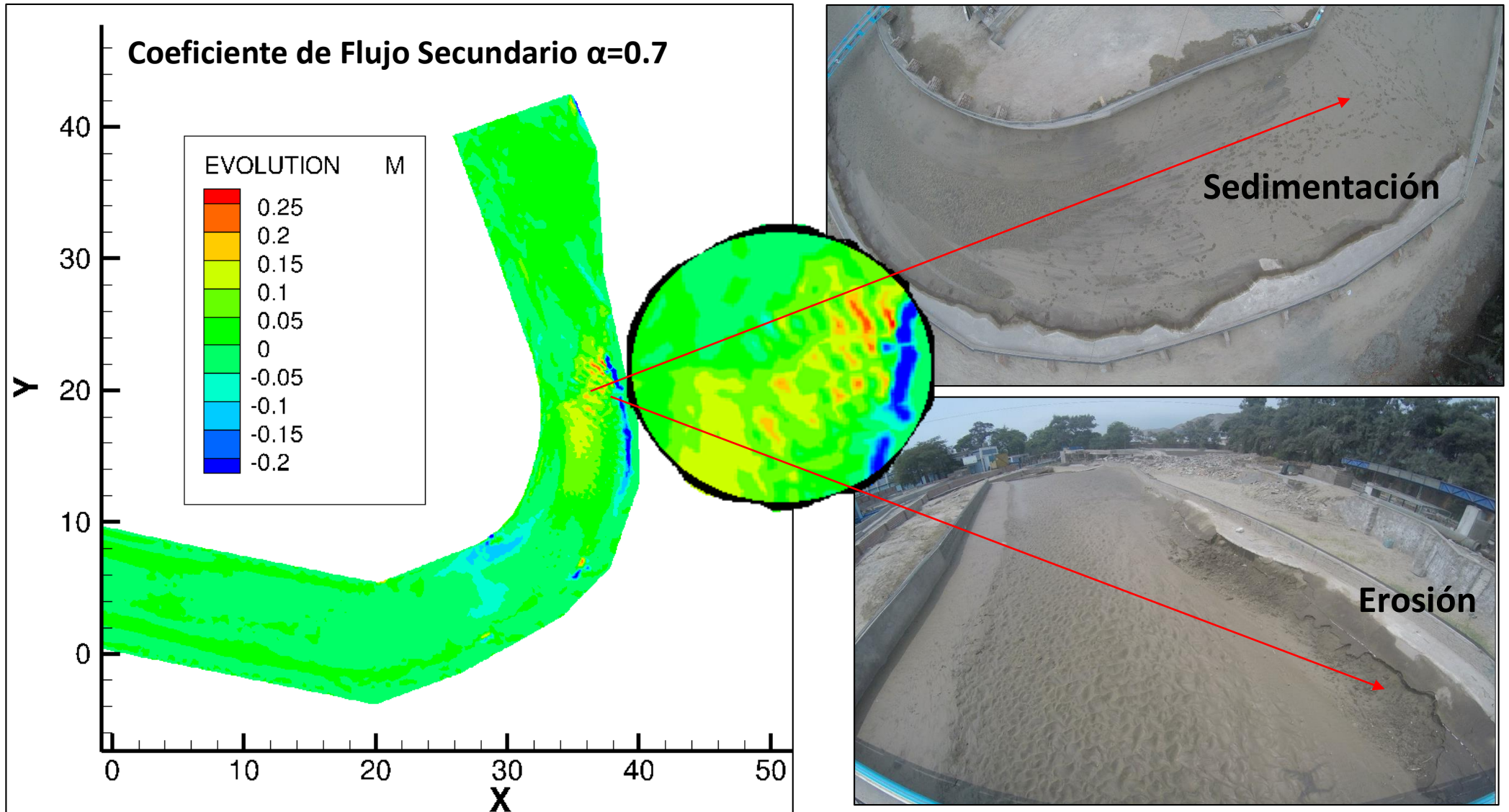
Figura 6.21: Coeficiente de flujo secundario  $\alpha=0.9$ 

*Fuente:Elaboración propia.*

Figura 6.22: Coeficiente de flujo secundario  $\alpha=1.2$ 

*Fuente:Elaboración propia.*

**Figura 6.23:** Para el coeficiente de flujo secundario  $\alpha = 0.7$ , se muestra una marcada erosión en la margen derecha y sedimentación en la margen izquierda.



Fuente: Elaboración propia.

## 6.4. Discusiones y comentarios

### 6.4.1. Corrección por la corriente secundaria

El análisis experimental se realizó en el Laboratorio Nacional de Hidráulica – LNH, al realizar un modelo numérico fue necesario hacer un análisis de sensibilidad de los parámetros que son los siguientes.

#### 6.4.1.1. El coeficiente de producción para la corriente secundaria $A_s$

Determina la tasa de producción de vorticidad. La evidencia experimental sugiere que este coeficiente debe ser mayor que 5. Este coeficiente está asociado con la advección de vorticidad. En el presente caso de estudio se usó el valor de 7 que llegó a representar mejor el problema físico como se muestra en el capítulo 6. Además se calculó el error porcentual donde muestra que al usar ambos coeficientes el error porcentual es mínimo con respecto a los datos medidos en la etapa experimental.

#### 6.4.1.2. El coeficiente de disipación para la corriente secundaria $A_{ds}$

Este coeficiente se establece en general en 0,5. Este coeficiente está asociado con la difusión lateral de la vorticidad fluvial debido a la turbulencia. En el presente estudio se usó dicho coeficiente con el valor de 0.5 y la difusión lateral ( $VELOCITY\ DIFFUSIVITY = 1.E-6$ ) de la vorticidad con el modelo de turbulencia K-epsilon como se muestra en la Figura 5.12. Ambos parámetros fueron sugeridos por Bernard y Schneider (1992) que los valores de ambos coeficientes empíricos deben establecerse mediante la comparación de prueba y error de las velocidades predichas y medidas. Tal como se desarrolló en el presente trabajo.

### 6.4.2. Corrección por efecto de pendiente (Effect Slope)

A continuación se muestra la fórmula que tiene implementada el software Open Telemac Mascaret para usar la opción de corrección por efecto de pendiente. FÓRMULA PARA EL EFECTO DE LA PENDIENTE = 1 es la formula de Koch y Flokstra donde aumenta



---

la velocidad de transporte cuesta abajo y la reduce por el factor  $(1 - B \frac{dz}{dx})$ , en lugar de cambiar el esfuerzo cortante crítico. La palabra clave Beta (B) tiene un valor predeterminado de 1.3. Debido a que la batimetría del modelo hidráulico tiene una alta resolución y que el problema a estudiar es altamente tridimensional se usó la opción 1 de corrección de pendiente. Finalmente al usar la corrección de flujo secundario, efecto de pendiente del lecho y el cálculo acoplado de las variables hidrodinámicas (velocidad, tirante) y transporte de sedimentos (erosión, sedimentación y evolución del lecho) se obtuvo mejores resultados como se muestra en el ítem 6.2. Donde se muestra resultados de variación del lecho con la corrección de flujo secundario (rojo) y sin corrección de flujo secundario (verde) y batimetría inicial (verde). En la figura 6.24 se muestra los resultados de simulación numérica después de acoplamiento de la hidrodinámica y transporte de sedimentos obteniendo una tasa de erosión en el banco exterior. Es importante considerar ambos parámetros en un software bidimensional que resuelven las ecuaciones Saint Venat en aguas poco profundas. Finalmente los resultados presentados son los que se plantearon en los objetivos.

---

# Conclusiones

- Se simuló numéricamente las características del flujo helicoidal que se forma en la sección transversal del tramo curvo del modelo hidráulico del río Madre de Dios que experimenta una aceleración radial y la fuerza centrífuga que actúa en proporción a la velocidad media. A su vez la superficie del agua está inclinada radialmente en el banco exterior para producir súper-elevación que genera un gradiente de presión para equilibrar el promedio de la fuerza centrífuga. Además por los resultados de la simulación permite concluir que el perfil de velocidades en el plano x-y debido a la formación del flujo helicoidal las velocidades son mayores en la margen derecha llegando a ser el máximo de 0.5m/s, como se muestra en la Figura 6.15.
- Se observó el efecto del flujo helicoidal en las riberas del tramo curvo, debido a la dirección de las líneas de corriente cerca del lecho y de la superficie libre que son opuestas y generan recirculación cerca a las riberas que genera el colapso.  
Cabe resaltar que al usar la corrección de flujo secundario que son los coeficientes  $A_s$  Producción de Flujo Secundario (Production for secondary currents) que su valor es 7.071 y el coeficiente  $A_{ds}$  Coeficiente de Disipación para Flujo secundario (Dissipation coefficient for secondary flow) que su valor es 0.5 para obtener mejores resultados en una simulación bidimensional fue prescindible usar ambos coeficientes porque el flujo en el tramo de estudio es tridimensional. Se obtuvieron mejores resultados como se muestra en las Figuras 6.1, 6.3 el perfil de velocidades obtenidos de la simulación se aproximan a las velocidades medidas en la etapa experimental.
- Se analizó el comportamiento de flujo helicoidal que ocurre en tramo curvo, para ello se incorpora la corrección de flujo secundario y se consiguió una adecuada representa-

ción del campo de velocidades, disminuyendo los errores de manera significativa. Por lo tanto, es necesario incorporar la corrección de flujo secundario para mantener la no-uniformidad del campo de velocidades en la vertical en modelos de profundidad promediada.

- Se interpretó e incorporo el efecto del flujo helicoidal, en el módulo de transporte de sedimentos (SISYPHE), para analizar la dinámica del transporte de sedimento. La tasa de transporte y la erosión incrementada debido al efecto del flujo helicoidal cerca a las riberas y en el lecho.

Cabe resaltar que al usar la corrección de flujo secundario en un modelo bidimensional al realizar el acoplamiento de módulo hidrodinámico y transporte de sedimentos se obtuvieron mejores resultados de la erosión y sedimentación como se muestra en las Figuras 6.18 y 6.19 donde los resultados de la simulación numérica de cambio de lecho se aproxima a los resultados obtenidos en la etapa experimental donde el levantamiento topográfico de la batimetría se realizo con un Escáner Láser de alta precisión. Además en la Figura 6.20 se muestra los resultados de la erosión originada por el efecto del flujo secundario.

- Se configuro el modelo numérico para hacer la simulación hidrodinámica y transporte de sedimentos con el módulo TELEMAC-2D y SISYPHE para interpretar el efecto del flujo helicoidal que tiene un efecto directo en los mecanismos de transporte de erosión y sedimentación. Como se muestra en la Figura 6.21 y 6.24 el cambio de la morfología del lecho debido al proceso de erosión en las margenes de las riberas.
-

## Recomendaciones

Se realizó simulaciones con el módulo hidrodinámico TELEMAC-2D; donde es difícil representar parámetros tridimensionales debido a que el flujo en canales curvos induce a una fuerza centrífuga que genera corriente secundaria y súper-elevación de la superficie de agua. Se recomienda realizar una simulación tridimensional. Con una parametrización relevante de efectos tridimensionales que pueden ser incorporados en un modelo hidrodinámico de profundidad promediada (bidimensional) en este casos no pueden capturar algunos parámetros tridimensionales. Estas limitaciones pueden ser representadas en un modelo tridimensional. Una simulación numérica tridimensional con TELEMAC-3D, donde se puede obtener una solución numérica de las ecuaciones de Navier Stokes el cual representara mejor los parámetros hidromorfodinamicos. Actualmente, la velocidad de cómputo y los programas de pre y post-procesamiento hacen posible la simulación de casos reales con una alta resolución, que es posible estudiar fenómenos altamente complejos

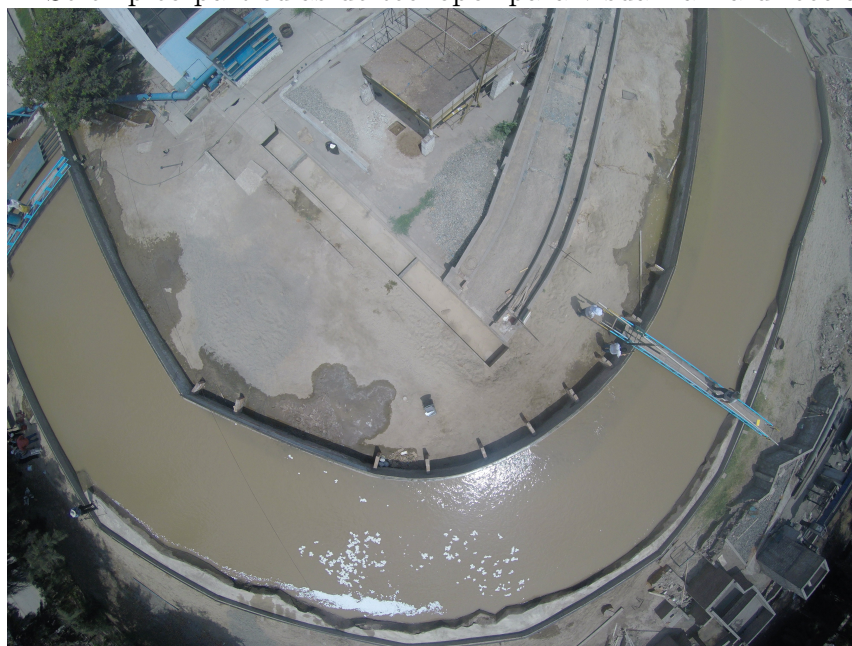
---

## ANEXOS

---

## Fotografías del modelo hidráulico del Río Madre de Dios -Tramo la Pastora

Figura 6.24: Se empleo partículas de tecnopor para visualizar la dirección del flujo



*Fuente:Elaboración propia.*

Figura 6.25: Configuración del lecho despues del experimento, se muestra el cambio de la morfología del lecho.



*Fuente:Elaboración propia.*

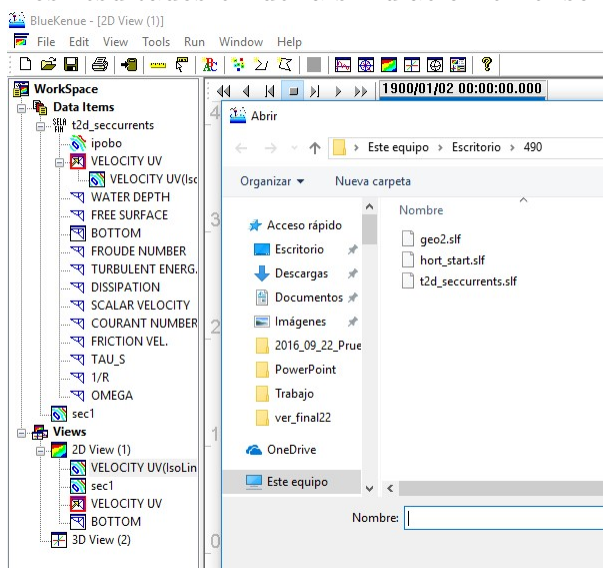
Figura 6.26: Configuración del lecho despues del experimento, se muestra el cambio de la morfologia del lecho.



*Fuente:Elaboración propia.*

## Fotografías del resultado del modelo numérico

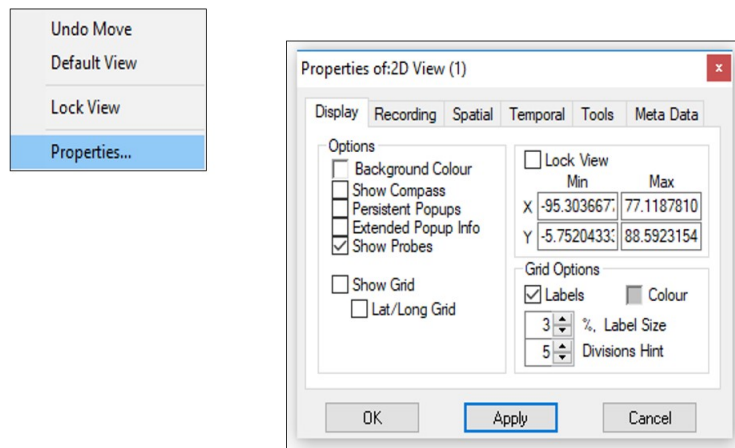
Figura 6.27: Abrir los resultados en de la simulación en el software Blue Kenue.



*Fuente:Elaboración propia.*

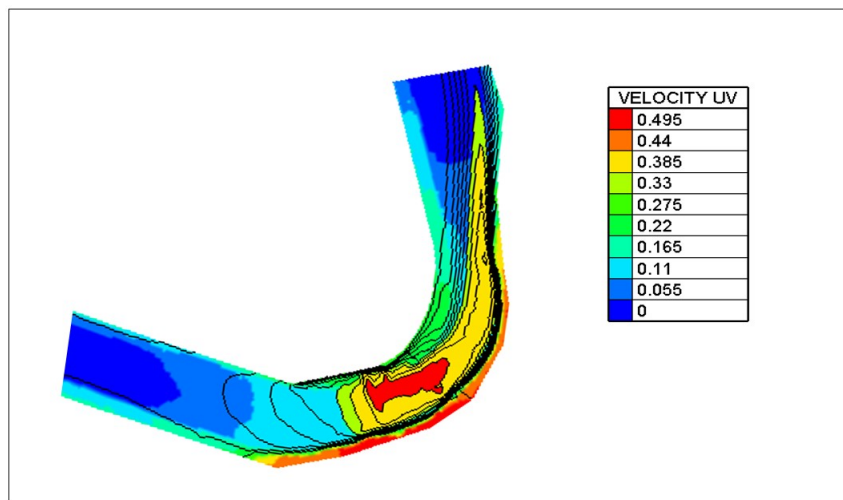


Figura 6.28: Hacer clic derecho en el espacio trabajo para quitar la grilla del espacio de trabajo.



*Fuente:Elaboración propia.*

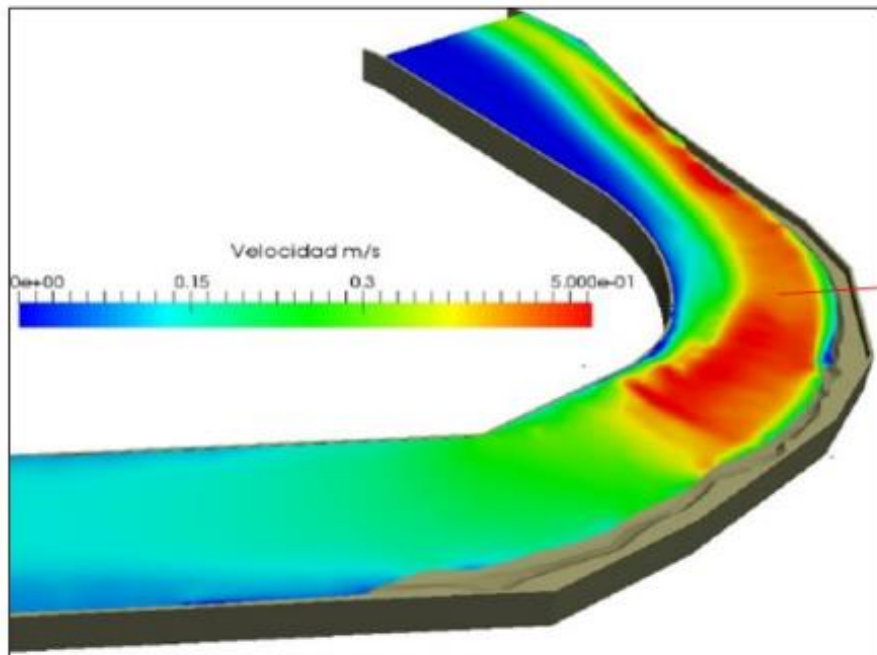
Figura 6.29: Se muestran las isolineas en el modelo experimental, donde el color rojo es la máxima velocidad.



*Fuente:Elaboración propia*



**Figura 6.30:** Se usó fluoresceína para ver el comportamiento del fluido en el modelo hidráulico, y se muestra que tiene el mismo patrón en los resultados del modelo numérico.



**Fuente:** Elaboración propia.

## Datos de velocidad medidos en el modelo hidráulico del río Madre de Dios - Tramo la Pastora

Tirante	Vx	Vy	Vz	Mag. V
[mm]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]
210	362.71	6.07	1.78	362.76
209	364.95	3.85	1.11	364.97
208	366.45	4.91	1.70	366.49
207	365.86	4.97	1.84	365.90
206	365.95	6.59	2.27	366.02
205	366.77	6.58	2.23	366.83
204	366.95	6.89	2.51	367.02
203	366.43	7.61	2.72	366.52
202	365.62	8.24	3.02	365.72
201	365.63	8.50	3.28	365.74
200	365.78	7.67	3.44	365.87
199	365.43	9.09	3.79	365.56
198	364.60	8.43	3.99	364.72
197	364.59	9.29	4.27	364.73
196	363.93	9.99	4.38	364.10
195	363.69	9.70	4.49	363.84
194	363.37	9.80	4.73	363.53
193	362.23	10.11	5.05	362.40
192	361.46	10.05	5.19	361.64
191	360.71	10.43	5.50	360.90
190	360.46	10.53	5.67	360.65

Tabla 6.15: Tabla de velocidades de la sección 1 en el punto 1

**Fuente:** Estudio De Línea de Base – FINCyT.

Tirante	Vx	Vy	Vz	Mag. V
[mm]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]
189	360.62	11.49	5.76	360.85
188	361.56	11.65	6.05	361.80
187	359.67	11.77	5.75	359.91
186	359.34	12.05	6.28	359.60
185	360.32	12.01	6.49	360.58
184	360.58	12.07	6.98	360.85
183	359.44	12.84	7.10	359.74
182	359.69	12.69	7.24	359.98
181	358.86	13.27	7.29	359.18
180	360.17	13.93	7.09	360.51
179	359.79	14.54	7.00	360.15
178	358.04	14.59	6.73	358.40
177	357.30	15.37	7.40	357.71
176	357.45	15.85	7.01	357.87
175	347.26	10.84	-1.39	347.44
174	351.31	10.01	-1.32	351.45
173	350.81	11.52	-1.31	351.00
172	352.05	10.35	-1.18	352.20
171	352.79	10.66	-0.82	352.95
170	352.49	11.13	-0.95	352.67

Tabla 6.16: Tabla de velocidades de la sección 1 en el punto 1

**Fuente:** Estudio De Línea de Base – FINCyT.

Tirante	Vx	Vy	Vz	Mag. V
[mm]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]
169	353.68	12.26	-1.05	353.89
168	353.43	12.01	-1.13	353.64
167	352.54	10.98	-1.33	352.71
166	352.64	10.97	-1.39	352.81
165	353.13	10.53	-1.49	353.29
164	353.60	10.85	-1.65	353.77
163	354.36	10.25	-1.50	354.51
162	354.49	10.18	-1.30	354.64
161	355.36	10.11	-1.37	355.50
160	354.98	10.00	-1.26	355.12
159	355.35	9.65	-1.18	355.49
158	354.75	9.35	-0.88	354.88
157	354.15	9.12	-0.79	354.27
156	354.73	8.84	-0.61	354.84
155	353.44	9.28	-0.47	353.56
154	353.24	9.42	-0.42	353.37
153	352.45	9.79	-0.63	352.59
152	354.37	10.08	-0.59	354.51
151	351.82	10.47	-0.43	351.97
150	352.03	10.96	-0.38	352.21
149	354.68	11.59	0.19	354.87

Tabla 6.17: Tabla de velocidades de la sección 1 en el punto 1

**Fuente:** Estudio De Línea de Base – FINCyT.

Tirante	Vx	Vy	Vz	Mag. V
[mm]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]
148	354.46	11.61	0.42	354.65
147	353.52	12.06	0.52	353.73
146	355.80	13.39	0.76	356.05
145	356.00	12.91	0.99	356.23
144	352.88	14.75	0.77	353.19
143	352.84	14.75	0.82	353.15
142	354.36	15.05	1.18	354.68
141	353.11	14.48	1.23	353.41
140	355.55	25.52	-9.55	356.60
139	356.50	6.55	-9.45	356.68
138	355.87	17.34	-9.91	356.43
137	355.38	20.60	-9.54	356.10
136	354.85	14.04	-8.54	355.23
135	355.29	18.39	-9.26	355.89
134	356.57	17.61	-9.42	357.13
133	355.14	18.30	-9.05	355.72
132	353.71	16.13	-9.41	354.20
131	353.45	22.06	-9.30	354.26
130	352.90	21.75	-9.39	353.69
129	353.61	23.97	-9.12	354.54
128	353.54	23.65	-9.45	354.46
127	351.40	24.73	-8.12	352.37

Tabla 6.18: Tabla de velocidades de la sección 1 en el punto 1

**Fuente:** Estudio De Línea de Base – FINCyT.

Tirante	Vx	Vy	Vz	Mag. V
[mm]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]
126	351.16	23.02	-8.46	352.01
125	350.41	23.81	-8.18	351.31
124	349.53	23.30	-7.92	350.40
123	349.11	23.44	-7.48	349.97
122	346.36	22.49	-7.35	347.17
121	346.14	22.52	-6.62	346.94
120	345.92	20.82	-6.39	346.61
119	345.22	32.91	-7.61	346.87
118	343.52	42.27	-9.22	346.23
117	345.31	49.00	-10.05	348.92
116	344.06	17.42	-5.83	344.55
115	343.50	32.65	-7.81	345.13
114	341.36	36.40	-7.16	343.37
113	342.93	16.66	-3.97	343.36
112	343.65	30.42	-5.76	345.04
111	340.74	34.89	-5.08	342.56
110	339.40	22.31	-5.80	340.18
109	333.90	41.76	-4.10	336.53
108	336.00	14.53	-9.29	336.44
107	334.47	38.80	-4.99	336.76
106	338.56	21.67	-5.81	339.30

Tabla 6.19: Tabla de velocidades de la sección 1 en el punto 1

**Fuente:** Estudio De Línea de Base – FINCyT.

Tirante	Vx	Vy	Vz	Mag. V
[mm]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]
105	339.40	29.36	-1.06	340.67
104	338.29	31.25	-0.93	339.73
103	339.30	32.45	-0.84	340.85
102	339.31	33.63	-0.29	340.97
101	338.97	33.57	-0.05	340.63
100	340.14	35.47	-0.03	341.99
99	339.93	35.89	0.19	341.82
98	338.69	35.52	0.40	340.55
97	338.36	36.53	0.51	340.32
96	337.50	36.71	1.03	339.49
95	337.69	36.47	1.21	339.66
94	338.29	36.82	1.45	340.29
93	338.38	37.10	1.58	340.41
92	337.48	37.33	1.77	339.55
91	337.39	38.90	2.19	339.63
90	336.96	39.53	2.32	339.28
89	335.72	39.95	2.60	338.09
88	334.01	41.01	2.46	336.53
87	335.14	40.51	2.60	337.59
86	331.91	39.47	2.61	334.26
85	331.29	40.61	2.36	333.78

Tabla 6.20: Tabla de velocidades de la sección 1 en el punto 1

**Fuente:** Estudio De Línea de Base – FINCyT.

Tirante	Vx	Vy	Vz	Mag. V
[mm]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]
84	332.28	41.17	2.05	334.82
83	330.98	42.39	1.88	333.69
82	328.44	44.51	1.82	331.44
81	328.50	44.27	1.99	331.47
80	329.71	45.11	2.26	332.79
79	329.33	45.87	2.84	332.52
78	329.99	46.62	3.25	333.29
77	329.74	46.82	3.72	333.07
76	328.18	47.98	3.57	331.69
75	323.29	47.81	3.49	326.82
74	321.73	47.84	3.53	325.28
73	318.62	47.60	3.46	322.18
72	313.41	47.25	3.54	316.97
71	306.16	47.25	3.91	309.81
70	311.86	20.31	3.17	312.53
69	323.68	22.23	3.92	324.47
68	330.36	22.19	2.70	331.12
67	340.19	22.85	3.09	340.97
66	342.02	23.35	3.61	342.83
65	344.92	22.88	3.83	345.70
64	346.27	23.24	3.79	347.07
63	346.14	22.06	4.28	346.87

Tabla 6.21: Tabla de velocidades de la sección 1 en el punto 1

**Fuente:** Estudio De Línea de Base – FINCyT.



Tirante	Vx	Vy	Vz	Mag. V
[mm]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]
62	345.58	22.48	4.60	346.34
61	345.89	23.75	4.75	346.74
60	346.07	24.36	4.82	346.96
59	345.73	25.82	5.09	346.73
58	346.06	25.05	5.55	347.01
57	345.62	26.21	5.69	346.66
56	345.02	26.23	5.93	346.07
55	344.16	26.55	6.13	345.24
54	343.20	26.87	6.39	344.31
53	343.10	28.16	6.64	344.32
52	341.45	27.94	6.80	342.66
51	340.38	27.51	7.15	341.56
50	339.13	28.05	7.31	340.36
49	338.97	27.63	7.54	340.18
48	339.65	26.62	7.48	340.78
47	338.70	27.35	7.64	339.88
46	338.48	25.66	7.51	339.53
45	336.85	25.70	7.67	337.91
44	335.93	25.22	7.91	336.97
43	335.87	24.13	8.38	336.84
42	334.38	24.80	8.43	335.41

Tabla 6.22: Tabla de velocidades de la sección 1 en el punto 1

**Fuente:** Estudio De Línea de Base – FINCyT.

Tirante	Vx	Vy	Vz	Mag. V
[mm]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]
41	335.08	23.69	8.70	336.03
40	335.18	25.21	8.71	336.24
39	333.60	25.25	8.63	334.66
38	331.96	25.76	8.69	333.07
37	330.68	25.37	8.65	331.77
36	329.05	24.38	9.25	330.08
35	234.63	41.22	3.45	238.25
34	261.43	42.16	3.57	264.83
33	289.49	49.75	1.72	293.74
32	294.32	48.33	2.10	298.27
31	295.17	48.91	2.26	299.21
30	295.60	48.36	2.74	299.54
29	294.30	48.73	3.23	298.33
28	290.07	49.52	3.81	294.30
27	287.40	47.73	4.49	291.37
26	283.39	46.37	5.26	287.21
25	280.23	47.40	6.06	284.27
24	277.42	46.36	6.74	281.35
23	273.49	46.19	7.51	277.47
22	269.31	45.38	8.20	273.23
21	266.32	44.89	9.28	270.24
20	262.45	43.80	10.35	266.28

Tabla 6.23: Tabla de velocidades de la sección 1 en el punto 1

**Fuente:** Estudio De Línea de Base – FINCyT.

Tirante	Vx	Vy	Vz	Mag. V
[mm]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]
19	258.78	41.48	11.43	262.33
18	253.15	39.63	12.59	256.54
17	247.90	38.41	13.60	251.23
16	240.51	36.51	14.17	243.68
15	231.85	33.75	14.97	234.77
14	222.44	31.23	15.08	225.13
13	212.29	29.28	15.56	214.87
12	201.30	27.44	15.90	203.78
11	172.05	16.61	13.56	173.39
10	63.41	-8.94	-1.57	64.06
9	15.48	-11.59	0.27	19.34
8	4.16	-0.06	0.56	4.20
7	0.33	0.02	-0.01	0.33
6	0.26	0.14	-0.03	0.30
5	2.60	0.31	0.09	2.62
4	0.37	1.26	-0.05	1.31
3	0.05	0.43	0.01	0.44
2	-0.41	1.68	-0.24	1.75
1	-2.84	0.41	-0.07	2.87

Tabla 6.24: Tabla de velocidades de la sección 1 en el punto 1

**Fuente:** Estudio De Línea de Base – FINCyT.

# Bibliografia

- ANDERSON, J. D. & WENDT, J. (1995). *Computational fluid dynamics*, vol. 206. Springer.
- ARMITAGE, N. & MCGAHEY, C. (2003). A unit stream power model for the prediction of local scour in rivers. *Water Research Commission. WRC Report* (1098/1), 03.
- BAGNOLD, R. A. (1966). *An approach to the sediment transport problem from general physics*. US government printing office.
- BROWN, C. B. (1950). Sediment transportation.
- CHANSON, H. (1999). The hydraulics of open channel flow: An introduction. physical modelling of hydraulics .
- CHENG, N.-S. (1997). Simplified settling velocity formula for sediment particle. *Journal of hydraulic engineering* **123**(2), 149–152.
- CHIEN, N. & WAN, Z. (1999). Mechanics of sediment transport. American Society of Civil Engineers.
- COLEBROOK, C. & WHITE, C. (1937). Experiments with fluid friction in roughened pipes. *Proc. R. Soc. Lond. A* **161**(906), 367–381.
- EINSTEIN, H. A. *et al.* (1950). *The bed-load function for sediment transportation in open channel flows*, vol. 1026. Citeseer.
- ENGELUND, F. & HANSEN, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams. *Technical University of Denmark Østervoldgade 10, Copenhagen K.* .

- 
- GESSLER, J. (1970). Self-stabilizing tendencies of alluvial channels. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division* **96**(2), 235–249.
- GRAF, W. H. & ALTINAKAR, M. S. (1998). *Fluvial hydraulics: Flow and transport processes in channels of simple geometry*. 551.483 G7.
- HERVOUET, J.-M. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method*. John Wiley & Sons.
- HRENYA, C., MILLER, S., MALLO, T. & SINCLAIR, J. (1998). Comparison of low reynolds number  $k-\varepsilon$  turbulence models in predicting heat transfer rates for pipe flow. *International journal of heat and mass transfer* **41**(11), 1543–1547.
- IYER, G. R. & YAVUZKURT, S. (1999). Comparison of low reynolds number  $k-\varepsilon$  models in simulation of momentum and heat transport under high free stream turbulence. *International journal of heat and mass transfer* **42**(4), 723–737.
- JULIEN, D. J., PIERRE Y ANTHONY (2002). Bed load motion and grain sorting in a meandering stream. *Journal of Hydraulic Research* **40**(2), 125–133.
- KOCH, F. C., FG (1980). *Bed Level Computations for Curved Alluvial Channels: Prepared for the 19th IAHR Congress, New Delhi, India, February 1981*. Waterloopkundig Laboratorium.
- LAUNDER, B. E. & SPALDING, D. B. (1983). The numerical computation of turbulent flows. In: *Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion*. Elsevier, pp. 96–116.
- LOHNES, R., RA Y HANDY (1968). Slope angles in friable loess. *The Journal of Geology* **76**(3), 247–258.
- MELVILLE, B. W. & RAUDKIVI, A. J. (1996). Effects of foundation geometry on bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering* **122**(4), 203–209.
- MEYER-PETER, E. & MÜLLER, R. (1948). Formulas for bed-load transport. In: *IAHSR 2nd meeting, Stockholm, appendix 2*. IAHR.
-

- 
- MORELL, M., TASSI, P. & VIONNET, C. (2014). Flow pattern at a river diffuence at the alluvial system of the paraná river. *Journal of Applied Water Engineering and Research* **2**(2), 140–156.
- POPE, S. B. (2001). Turbulent flows.
- PUHAKKA, M., KALLIOLA, R., RAJASILTA, M. & SALO, J. (1992). River types, site evolution and successional vegetation patterns in peruvian amazonia. *Journal of Biogeography* , 651–665.
- RASTOGI, A. K. & RODI, W. (1978). Predictions of heat and mass transfer in open channels. *Journal of the Hydraulics division* **104**(3), 397–420.
- RAUDKIVI, A. & SUTHERLAND, A. (1981). Scour at bridge crossings: Wellington, new zealand, national roads board, road research unit. *Bulletin* **54**, 100.
- RIESTERER, J., WENKA, T., BRUDY-ZIPPELIUS, T. & NESTMANN, F. (2016). Bed load transport modeling of a secondary flow influenced curved channel with 2d and 3d numerical models. *Journal of Applied Water Engineering and Research* **4**(1), 54–66.
- SCHLICHTING, H., GERSTEN, K., KRAUSE, E., OERTEL, H. & MAYES, K. (1955). *Boundary-layer theory*, vol. 7. Springer.
- SHIELDS, A. (1936). Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement .
- SIMON, A. (1989). Shear-strength determination and stream-bank instability in loess-derived alluvium, west tennessee, usa. *Applied Quaternary Research, EJ DeMulder and B. l Hageman (Editors). AA Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands* , 129–146.
- SIMONS, D. B. & RICHARDSON, E. V. (1966). *Resistance to flow in alluvial channels*. US Government Printing Office.
- STRUIKSMA, N., OLESEN, K., FLOKSTRA, C. & DE VRIEND, H. (1985). Bed deformation in curved alluvial channels. *Journal of Hydraulic Research* **23**(1), 57–79.
-

- 
- TALAPATRA, S. & GHOSH, S. (1983). Incipient motion criteria for flow over a mobile bed sill. In: *Proceedings of the 2nd International Symposium on River Sedimentation*. Water Resources and Electric Power Press Nanjing.
- TASSI, K. E. K. A., D. WANG (2014). Flow and bed morphology in large-amplitude meanders, comparison of two and three-dimensional numerical models. *Water Resources Research* **45**(2).
- TERZAGHI, K., PECK, R. B. & MESRI, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- VAN RIJN, L. C. *et al.* (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*, vol. 1006. Aqua publications Amsterdam.
- VANONI, V. A. & NOMICOS, G. N. (1959). Resistance properties of sediment-laden streams. *Journal of the Hydraulics Division* **85**(HY5), 77–107.
- VERSTEEG, W., HK MALALASEKERA (1995). ,“an introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method” addison wesley longman, ltd., harlow, england. .
- VILLARET, C., HERVOUET, J.-M., KOPMANN, R., MERKEL, U. & DAVIES, A. G. (2013). Morphodynamic modeling using the telemac finite-element system. *Computers & Geosciences* **53**, 105–113.
- WHITE, F. M. (1991). Viscous fluid flow mcgraw-hill book company. *New York* **19**(1), 400.
- YANG, C. T. & SONG, C. (1979). Theory of minimum rate of energy dissipation. *Journal of the Hydraulics Division* **105**(7), 769–784.
- YOUNG, D. F., MUNSON, B. R., OKIISHI, T. H. & HUEBSCH, W. W. (2010). *A brief introduction to fluid mechanics*. John Wiley & Sons.
-